



Universidad de San Carlos de
Guatemala Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Estadística Aplicada

**APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL “PARCELAS DIVIDIDAS” PARA LA
EVALUACIÓN DEL NIVEL DE HUMEDAD DEL SUELO Y TIPO DE MADURACIÓN EN LA
VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR CG02- 163, COSECHADA EN EL MES DE ABRIL 2021,
EN ESCUINTLA, GUATEMALA**

Ing. Hector Noé Monterroso Silvestre
Asesorado por el Mtro. Otto René Castro Loarca

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL “PARCELAS DIVIDIDAS” PARA LA
EVALUACIÓN DEL NIVEL DE HUMEDAD DEL SUELO Y TIPO DE MADURACION EN LA
VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR CG02- 163, COSECHADA EN EL MES DE ABRIL 2021,
EN ESCUINTLA, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. HECTOR NOÉ MONTERROSO SILVESTRE

ASESORADO POR EL MTRO. OTTO RENÉ CASTRO LOARCA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN ARTES EN ESTADISTICA APLICADA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco
EXAMINADOR	Mtro. William Eduardo Faggiani Cruz
SECRETARIO	Mtro. 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:

**APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL “PARCELAS DIVIDIDAS” PARA LA
EVALUACIÓN DEL NIVEL DE HUMEDAD DEL SUELO Y TIPO DE MADURACIÓN EN LA
VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR CG02- 163, COSECHADA EN EL MES DE ABRIL 2021,
EN ESCUINTLA, GUATEMALA.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha agosto 2022.

Ing. Héctor Noé Monterroso Silvestre

LNG.DECANATO.OI.795.2022

La Decana 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 Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL “PARCELAS DIVIDIDAS” PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE HUMEDAD DEL SUELO Y TIPO DE MADURACIÓN EN LA VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR CG02- 163, COSECHADA EN EL MES DE ABRIL 2021, EN ESCUINTLA, GUATEMALA,** presentado por: **Hector Noé Monterroso Silvestre**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Estadística aplicada después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, noviembre de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, noviembre de 2022

LNG.EEP.OI.795.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL “PARCELAS DIVIDIDAS” PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE HUMEDAD DEL SUELO Y TIPO DE MADURACIÓN EN LA VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR CG02- 163, COSECHADA EN EL MES DE ABRIL 2021, EN ESCUINTLA, GUATEMALA”

presentado por **Hector Noé Monterroso Silvestre** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Estadística aplicada** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Guatemala, 22 de junio de 2021.

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí.
Director de la Escuela de Estudios de Postgrado.
Facultad de Ingeniería
USAC.
Presente.

Estimado Maestro Álvarez Cotí:

De la manera más atenta me dirijo a usted, para hacer de su conocimiento que el estudiante de la Maestría en Estadística Aplicada, **HECTOR NOE MONTERROSO SILVESTRE** quien se identifica con registro académico número **009994337** y código único de identificación **CUI 1960 35783 0103** , me presentó el protocolo de su trabajo de graduación titulado **APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL “PARCELAS DIVIDIDAS” PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE HUMEDAD DEL SUELO Y TIPO DE MADURACION EN LA VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR CG02- 163, COSECHADA EN EL MES DE ABRIL 2021, EN ESCUINTLA, GUATEMALA**, asesorado por Otto René Castro Loarca.

Luego de revisar el protocolo el cual fue aprobado por el Mtro. William Eduardo Fagiani Cruz y que el estudiante **MONTERROSO SILVESTRE**, ha realizado las correcciones solicitadas por el suscrito, le doy mi aprobación, solicitándole le sea elaborada la carta de aprobación correspondiente.

Sin otro particular, me suscribo.

Atentamente,



Edwin Adalberto Bracamonte Orozco
Coordinador
Maestría en Estadística Aplicada

Guatemala, 03 de agosto de 2021.

M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

Estimado M.A. Ing. Álvarez Cotí

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **"APLICACIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL "PARCELAS DIVIDIDAS" PARA LA EVALUACIÓN DEL NIVEL DE HUMEDAD DEL SUELO Y TIPO DE MADURACION EN LA VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR CG02- 163, COSECHADA EN EL MES DE ABRIL 2021, EN ESCUINTLA, GUATEMALA,"** del estudiante **HECTOR NOÉ MONTERROSO SILVESTRE** del programa de Maestría en **ESTADÍSTICA APLICADA**, identificado con número de registro académico: **009994337**.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Otto René Castro Loarca
INGENIERO AGRÓNOMO
COLEGIADO No. 495

MSc. Ing. Agr. Otto René Castro Loarca

Colegiado No. 495

Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

- | | |
|---------------------|---|
| Dios | Por proveerme entendimiento, fortaleza y ser un guía en mi vida. |
| Mi familia | Mi pequeña hija Daniela Monterroso por ser mi fortaleza, mi alegría y mi esposa Heidy Botzoc por brindarme el amor, cariño y apoyo, y todo lo necesario para seguir adelante. |
| Mis padres | Por enseñarme los principios esenciales para la vida que me han permitido alcanzar la superación personal. |
| Mis hermanos | Jorge, Carlos, Edy, Juan, María, Gerónimo y Lesbia Monterroso, por el apoyo brindado a lo largo de mi vida. |

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser una institución líder en oportunidades y preparación académica y ahora mi *alma mater*.

**Facultad de Ingeniería y
Escuela de Estudios de
Postgrado**

Por la oportunidad brindada para el desarrollo del posgrado esencial para mi crecimiento académico.

Mis maestros

Por la experiencia, conocimiento y estrategias compartidas para la facilitación del aprendizaje.

**Mis compañeros
de maestría**

Fabiola Ramírez, Esteban Fernández y Cristian Acú, por todo lo vivido, compartido, así mismo, el afecto mostrado a lo largo de la maestría.

Mi asesor

Dr. Otto Castro, por compartir su experiencia, conocimiento y a la vez la retroalimentación brindada para la realización de mi trabajo de investigación.

Mi asesora

Dra. Rodríguez, Por todo el apoyo que fue fundamental para la finalización de mi maestría.

CENGICAÑA

Por permitirme realizar la investigación fundamental para mi preparación académica.

**Ing. Joel Morales e
Ing. Carlos Mazariegos**

Por permitir realizar la investigación en su área de trabajo, así como, el apoyo, asesoría y experiencia compartida en todo el proceso del estudio.

Dr. Gerardo Espinoza

Por la experiencia brindada en la discusión de los resultados de la investigación.

ÍNDICE GENERAL

INDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XI
OBJETIVOS	XV
MARCO METODOLÓGICO	XVII
INTRODUCCIÓN	XXXI
1. MARCO REFERENCIAL	1
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Fundamentos estadísticos	9
2.1.1. Diseños y análisis de experimentos	9
2.1.1.1. Diseño experimental parcelas divididas	11
2.1.2. Validez de supuestos del análisis	15
2.1.3. Prueba Post Hoc	16
2.2. Manejo agronómico en maduración de caña de azúcar	18
2.2.1. Maduración	18
2.2.1.1. Maduración natural	19
2.2.1.2. Maduración química	20
2.2.1.3. Efecto de maduración química en el rebrote	20
2.2.1.4. Beneficios en la producción	21
2.2.1.5. Factores para considerar en la aplicación	21
2.2.1.6. Monitoreo de la concentración de sacarosa posterior a la aplicación de madurante	22

2.2.2.	Manejo de riego en maduración	22
2.2.2.1.	Operación del sistema de riego	23
2.2.2.2.	Control de humedad en el suelo	24
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	27
3.1.	Efecto en la acumulación de azúcar	27
3.2.	Efecto en las toneladas de caña por hectárea	29
3.3.	Efecto en el rebrote	32
3.4.	Selección del mejor tratamiento.....	35
3.5.	Verificación de supuestos	38
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
4.1.	Efecto en la masa de azúcar por tonelada.....	43
4.2.	Efecto en las toneladas de caña	44
4.3.	Efecto en el rebrote a los 32 días después del corte	45
4.4.	Toneladas de azúcar	47
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES	53
	REFERENCIAS.....	55

INDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Plano de evaluación de nivel de humedad y tipo de maduración.....	XXII
2. Aplicación de Moddus 25 EC con dron.....	XXIII
3. Presentación del portal web CENGIRIEGOS V3.1	XXIV
4. Muestras de tallos de caña de azúcar	XXV
5. Foto con dron a los 21 días después del corte	XXVI
6. Comportamiento de concentración de sacarosa.....	27
7. Comportamiento del TCH.....	30
8. Comportamiento de la población	32
9. Comportamiento de altura	33
10. Comportamiento del contenido de clorofila.....	33
11. Comportamiento de TAH según la humedad y maduración.....	36
12. QQ-plot para todas las variables	39
13. Homocedasticidad en concentración de azúcar, TCH y TAH	40
14. Comportamiento del consumo de humedad.	40
15. Tendencia del contenido de azúcar por tonelada	41

TABLAS

I. Variables del estudio.....	XVIII
II. Fechas de muestreo para el análisis de jugo de los tallos de la caña.	XXV
III. Presentación de la información previa al análisis.	13
IV. Planteamiento del análisis de varianza	14

V.	ANOVA para la concentración	28
VI.	Análisis múltiple de medias LSD Fisher con un alfa=0.10.....	29
VII.	ANOVA para las TCH	31
VIII.	Análisis múltiple de medias LSD Fisher con un alfa=0.10.....	31
IX.	ANOVA para altura del rebrote	34
X.	ANOVA para la población del rebrote	34
XI.	ANOVA para el contenido de clorofila del rebrote.....	35
XII.	ANOVA para TAH.....	36
XIII.	Análisis múltiple de medias LSD Fisher con un alfa=0.10.....	37
XIV.	Análisis múltiple de medias LSD Fisher con un alfa=0.10.....	37
XV.	Prueba de normalidad Shapiro-Wilks.....	38
XVI.	Determinación del ingreso neto	42

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm	Centímetro
%Pol	Concentración de sacarosa
θFC	Contenido de agua a capacidad de campo en 00/100.
θWP	Contenido de agua a punto de marchitez permanente en 00/100.
D.Ap.	Densidad aparente en gramos por centímetro cubico.
Dda	Días después de aplicación
\$	Dólares estadounidenses
°C	Grados Celsius
ha	Hectárea
h	Hora
Hg	Humedad gravimétrica
lt	Litro
<	Menor
m	Metro
m²	Metro cuadrado
ml	Metro lineal
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm	Milímetro
%	Porcentaje
%H	Porcentaje de humedad
Zr	Profundidad radicular en m.

TC

Tonelada de caña

GLOSARIO

ADT	Agua disponible total
AFA	Agua fácilmente aprovechable
Aleatorización	Consiste en la asignación al azar de factor o tratamientos en las unidades experimentales.
Capacidad de campo	Valor máximo de retención de humedad luego de drenar el exceso por gravedad.
Déficit permitido de manejo	Fracción de humedad del suelo que puede ser consumida del total de agua disponible.
Humedad gravimétrica	Valor exacto del contenido de humedad en el suelo.
LSD	Diferencia mínima significativa
MODDUS	Producto comercial con ingrediente activo Trinexapac etil.
Muestra	Es una porción de una población para inferir sobre ella.

Punto de marchitez permanente	Valor mínimo de porcentaje de humedad donde la planta puede absorber humedad.
Regulador de crecimiento	En este caso son productos usado para afecta el crecimiento de la caña de azúcar.
Significancia	Medida estadística sobre la confiabilidad de los resultados de un análisis.
TAH	Toneladas de azúcar por hectárea
TCH	Toneladas de caña por hectárea
Unidad experimental	Corresponde al área de evaluación de un factor o tratamiento.

RESUMEN

El propósito del estudio consistió en evaluar las prácticas agrícolas, el manejo del riego y la aplicación de productos químicos, para incrementar la sacarosa en la maduración del cultivo de la variedad de caña de azúcar CG02-163.

El objetivo del estudio consistió en aplicar el diseño experimental de parcelas divididas en área que se cortó en el mes de abril para conocer el efecto del nivel de humedad del suelo y tipo de maduración del cultivo sobre la concentración de sacarosa en caña de azúcar, toneladas de caña y en el rebrote.

El estudio tiene enfoque experimental definiéndose como parcela grande el tipo de maduración; siendo natural o química, en este sentido, se usó como madurante Moddus 25EC, que regula el crecimiento. Para la parcela pequeña se consideró el manejo de los niveles de humedad de 60,50 y 40 por ciento de consumo en el suelo y se usó el método gravimétrico como medida de control para el riego. Para establecer las diferencias estadísticas de los tratamientos se realizó el análisis de varianzas, análisis gráficos, una vez conociendo la significancia se realizaron pruebas post hoc, para seleccionar el mejor tratamiento.

El resultado principal obtenido consistió en identificar el mejor tratamiento con una probabilidad de contraste menor al 10 %, siendo el mejor tratamiento el manejo de la humedad con nivel de consumo del 60 por ciento y maduración natural, los cuales favorecen la producción de toneladas de azúcar por hectárea teniendo un beneficio de US\$561.92/ha respecto al aplicar madurante y manejar

un nivel de consumo del 60 % de humedad. Entre otros resultados se puede mencionar, que el tipo de maduración es determinante para la producción de toneladas de caña por hectárea, más si existe un mayor consumo de humedad del suelo, según lo observado puede reducir hasta 7.88 si se aplica madurante respecto a la maduración natural. Para el caso de concentración de azúcar se observa que a medida que se aumenta el consumo de humedad se incrementa la concentración de azúcar y las mejores concentraciones se dieron cuando existió un consumo del 60 % de humedad. Para las variables de rebrote; altura, población y contenido clorofila, no existió diferencia significativa entre el tipo de maduración y nivel de humedad.

Se recomienda no generalizar los resultados por la heterogeneidad de condiciones en los campos donde se cultiva la caña de azúcar, por lo que se debe continuar las evaluaciones de la misma naturaleza en distintas texturas de suelos, mes de corte y variedades de caña de azúcar mediante diseños experimentales para encontrar la mejor combinación de humedad de suelo y maduración favorable.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contexto general

Se siembra caña de azúcar en el sur de Guatemala con el propósito de obtener sacarosa de la misma, por lo que los esfuerzos, de toda práctica agrícola realizada al cultivo consiste en el mantenimiento y aumento de la misma, siendo la practica más usada para el incremento de sacarosa, la aplicación de productos químicos como madurantes en la etapa de maduración del cultivo, esto se refleja en el registro del 82 % del área cultivada con caña de azúcar en el sur de Guatemala, correspondiente al periodo de corte entre noviembre 2010 a mayo 2011, teniendo como propósito el anticipar la maduración de la caña de azúcar, reduciendo la tasa de desarrollo vegetativo para incrementar la sacarosa al momento de cosecha. (Espinoza, 2012)

Resultados de investigaciones realizadas por Cengicaña, han concluido que se maximiza la concentración de sacarosa entre los 28 a 56 días después de la aplicación del madurante químico, por lo que es necesario planificar su corte durante este intervalo de tiempo, otro factor importante que contribuye es la suspensión del riego, una vez se haya aplicado madurante que generalmente se realiza a los 45 días antes del corte, esto hace que se limite el consumo de agua por la planta, disminuyendo el crecimiento y afectando la biomasa, este último efecto puede ser más drástico según la textura de suelo que hace que exista diferente nivel de humedad disponible durante el tiempo de suspensión de riego.

Es necesario mencionar que la aplicación de madurante se realiza sin conocer el nivel de humedad de suelo y textura, en este caso en un nivel bajo de humedad puede acelerar el efecto del madurante, generando un estrés demasiado alto que afecta la producción de sacarosa al no tener disponibilidad de agua para realizar actividades fisiológicas esenciales para la vida de la planta, siendo de importancia el estudio de niveles de humedad del suelo después de la aplicación de madurante para definir el efecto de la humedad del suelo y a la vez efecto del madurante, con el propósito de generar recomendaciones que permitan la maximización de la concentración de sacarosa.

Descripción del problema

La producción de sacarosa está definida en toneladas de azúcar por hectárea. En la actualidad se desconoce si la suspensión del riego generalizada a los 45 días antes del corte, sin considerar el contenido de humedad disponible en el suelo, la textura del suelo y la variedad, afectan la concentración de sacarosa, siendo requerido establecer un experimento bajo un diseño experimental en parcelas divididas, para evaluar el nivel del contenido de humedad del suelo, la maduración ya sea natural o química del cultivo, que permita incrementar la concentración de sacarosa, sin afectar la biomasa, al mismo tiempo se medirá el efecto de los factores en el rebrote del cultivo después del corte, esto se realizará para cada tratamiento evaluado.

Formulación del problema

Esto conlleva a plantear la pregunta central de esta investigación: ¿Qué nivel de humedad del suelo y tipo de maduración del cultivo permite incrementar la concentración de sacarosa en caña de azúcar al menor costo?, siendo

necesario responder las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cómo el tipo de maduración y nivel de humedad en el suelo en la etapa de maduración afecta la concentración de sacarosa en caña de azúcar?
- ¿Cómo el tipo de maduración y nivel de humedad en el suelo en la etapa de maduración afecta las toneladas de caña por hectárea?
- ¿Cómo el tipo de maduración y nivel de humedad en el suelo en la etapa de maduración afecta en el desarrollo del rebrote del cultivo después del corte?
- ¿Qué combinación de tratamiento presenta el menor costo por la aplicación del riego?

OBJETIVOS

General

Evaluar el nivel de humedad de suelo y tipo de maduración en la variedad CG02-163, a través de un diseño experimental en parcelas divididas, para conocer el efecto sobre la concentración de sacarosa en caña de azúcar, toneladas de caña y rebrote.

Específicos

1. Establecer si existe diferencia significativa entre los tratamientos evaluados y la concentración de sacarosa por medio de un análisis de varianza.
2. Conocer si existe diferencia significativa entre los tratamientos evaluados y la cantidad de toneladas de caña por hectárea por medio de un análisis de varianza.
3. Conocer si existe diferencia significativa entre los tratamientos evaluados y rebrote después del corte por medio de un análisis de varianza.
4. Conocer el tratamiento con mejores resultados de concentración de sacarosa, toneladas de caña por hectárea y rebrote con el menor costo por medio de pruebas *post hoc*.

MARCO METODOLÓGICO

Características del estudio

El enfoque de la presente investigación es cuantitativo porque está constituido por variables como lo son; la concentración de sacarosa, las toneladas de caña por hectárea al momento del corte y el desarrollo de rebrote después del corte, bajo estos resultados se definió el mejor tratamiento sobre el nivel de humedad y tipo de maduración, mediante análisis estadísticos.

El tipo de estudio es experimental, porque se usaron unidades bajo un diseño en parcelas divididas, donde se estudió el efecto del variable nivel de humedad de suelo como sub parcela y tipo de maduración como parcela, sobre la concentración de sacarosa y cantidad de biomasa al momento de la cosecha, así mismo el desarrollo de rebrote luego de la cosecha, considerándose el diseño experimental idóneo para reducir y controlar la varianza por los gradientes de influencia y las condiciones en campo, donde se evaluaron los distintos tratamientos.

Los resultados se estudiaron mediante un análisis de varianza, para inferir el tratamiento con mayor concentración de sacarosa para la variedad de caña de azúcar CG02-163 y al existir significancia, posteriormente se realizaron pruebas post hoc, para generar recomendaciones sobre el nivel de humedad de suelo y el tipo de maduración.

Tiene un alcance explicativo, porque se analizaron los datos generados para estimar la concentración de sacarosa respecto a los resultados de laboratorio del análisis de jugos según el tipo de maduración y para cada caso del nivel de humedad de suelo, de la misma manera sea analizo las toneladas de caña por hectárea para cada tratamiento. Los resultados de humedad del suelo ayudaron para la aplicación y manejo del experimento según el nivel evaluado. El análisis se realizó de forma gráfica y estadística, para determinar la respuesta de los tratamientos evaluados.

Unidades de análisis

El estudio se estableció en áreas donde se planificó la cosecha para abril de 2021, con una altitud <100 msnm, suelo de textura franco-arenosa. En la localidad existieron influencia de lluvias aisladas que alteraron el nivel de humedad de suelo, que corresponde a factor evaluado en las parcelas pequeñas, siendo en las mismas donde colectaran las muestras de suelo y caña de forma aleatoria, que fueron estudiadas para cuantificar el efecto de los tratamientos evaluados.

VARIABLES

Tabla I. **Variables del estudio**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Humedad del suelo	Es la relación entre la masa de agua contenida por cada unidad de masa de suelo. Es una variable cuantitativa continua.	Muestreo de suelo para la determinación de humedad a nivel de laboratorio por medio de gravimetría, valores

Continuación tabla I.

(%H)		expresados en porcentaje, variable de escala de razón.
Concentración de sacarosa (%Pol)	Contenido de sacarosa en el jugo de caña de azúcar. Variable cuantitativa continua.	Obtenida de tallos de caña de azúcar, mediante análisis de jugos a nivel de laboratorio y se expresa en Porcentaje, variable de escala de razón.
Toneladas de caña por hectárea (TCH)	Es unidad de masa expresada en el sistema internacional como toneladas, para este caso toneladas de caña por hectárea. Variable cuantitativa continua.	Obtenida del peso de todos los tallos de caña de azúcar por unidad experimental convertido a toneladas de caña por hectárea, variable de escala de razón.
Toneladas de caña por hectárea (TAH)	Es unidad de masa expresada en el sistema internacional como toneladas, para este caso toneladas de azúcar por hectárea. Variable cuantitativa continua.	Valor obtenido del producto de la concentración de sacarosa por las toneladas de caña por hectárea por cada unidad experimental, variable de escala de razón.
Altura en rebrote. (m)	Es la medición de altura tallos en metros. Variable cuantitativa continua.	Valor obtenido de mediciones de altura tallos que emergen luego de la cosecha, variable de escala de

Continuación tabla I.

		razón.
Población en rebrote. (tallos/ml)	Conteos expresados en número de tallos por metro lineal. Variable cuantitativa continua.	Valor obtenido de conteos de tallos que emergen luego de la cosecha, variable de escala de razón.

Fuente: elaboración propia.

Fases del estudio

Fase 1. Revisión de literatura

Permitió fundamentar la investigación y planteamiento de la propuesta del uso de diseños experimentales para atender la problemática del nivel de humedad de suelo y tipo de maduración antes de la cosecha. Se recopiló información de libros, tesis, artículos de revistas científicas relacionadas con la propuesta. Esto conlleva a establecer un principio teórico que permita establecer el planteamiento para el desarrollo del estudio.

Fase 2. Construcción del diseño experimental

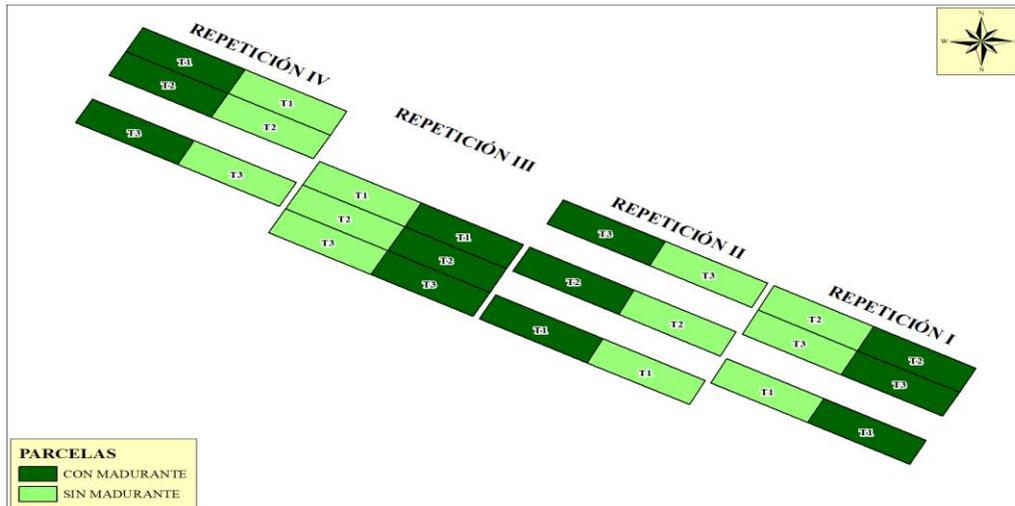
Se estableció un diseño de parcelas divididas, con cuatro repeticiones, con el propósito de reducir el error experimental, generado por el gradiente de variación de la composición del suelo del sitio donde se realizará la evaluación, siendo la misma la heterogeneidad del suelo, por lo que se estaría aislando como fuente de variación los tratamientos y bloques.

Fase 3. Gestión o recolección de la información

Para manejar el experimento, es importante generar un plano espacial que identifique cada unidad dentro del área experimental, por tanto, esto evitó posibles errores humanos para la aplicación de tratamientos en el manejo del nivel de humedad del suelo y el tipo de maduración en la caña de azúcar, donde se debía previamente delimitar el área donde se aplicaría el producto químico como madurante.

El tamaño de la unidad experimental en este caso la parcela pequeña donde fueron evaluados los tres niveles de humedad y para cada nivel de humedad se usaron cuatro surcos con un distanciamiento de 1.8 metros entre cada uno con una longitud de 20 metros, teniendo un área de 144 metros cuadrados, superior a los 90 metros cuadrados que regularmente se usan para ensayos experimental en caña de azúcar, siendo así, el tamaño de la parcela grande, donde se evaluó el tipo de maduración, fue de 720 metros cuadrados para cada tipo de maduración, teniendo un área total del experimento de 5,760 metros cuadrados es decir 0.576 hectáreas.

Figura 1. Plano de evaluación de nivel de humedad y tipo de maduración



Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

Parcelas grandes del experimento

Se usaron para la evaluación de la maduración del cultivo, ya sea, natural o estimulada por la aplicación de productos químicos, siendo así, para las aplicaciones de madurante en la práctica normal se usan helicópteros o avionetas porque son grandes extensiones, pero en este caso, la parcela grande tenía el largo de 20 metros por lo que se usó dron para la aplicación del producto químico, donde se aplicó Moddus 25 EC a una dosis de 1 litro por hectárea en las área indicadas en la figura del plano de evaluación, el producto funciona como regulador del crecimiento de la caña de azúcar para mejorar la concentración de azúcar en el tallo, la aplicación se realizó a los 62 días antes del corte.

Figura 2. **Aplicación de Moddus 25 EC con dron**

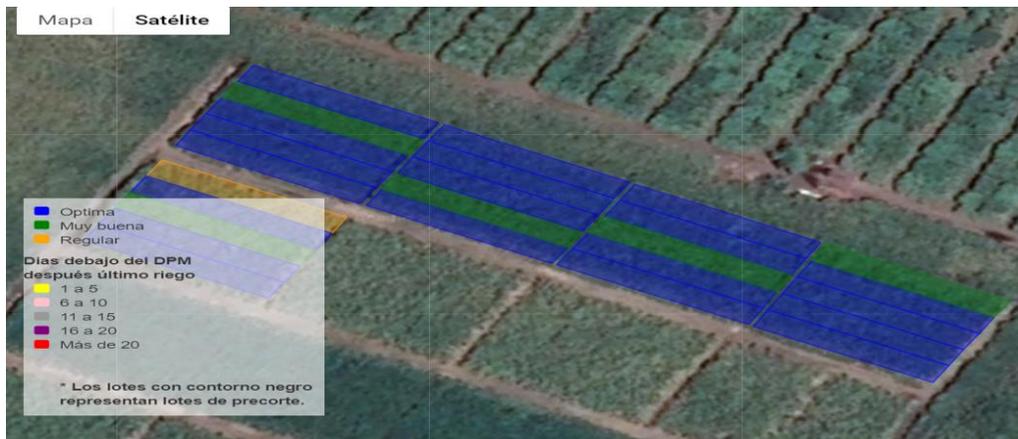


Fuente: [Fotografía de Hector Monterroso]. (La Gomera, Escuintla. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Parcelas pequeñas del experimento

Para manejar los niveles de humedad en el suelo es imprescindible muestrear la humedad del suelo, parámetro usado para determinar el contenido de humedad, el análisis se realizó en el laboratorio agroindustrial de CENGICAÑA, través del método de humedad gravimétrica en tres profundidades de suelo, 0-20,20-40 y 40-60 cm, luego, esta información fue procesada en el software CENGIRIEGOS V3.1, generando una estimación de la lámina a reponer, según el nivel de humedad correspondiente en cada tratamiento, para ello se consideró tres distintos manejos, el primero que consistió el manejo de humedad hasta un 40 por ciento de consumo, el segundo hasta un 50 por ciento de consumo y por último el tercero hasta un 60 por ciento de consumo.

Figura 3. Presentación del portal web CENGIRIEGOS V3.1



Fuente: elaboración propia, realizado con Google Maps.

Para responder a los objetivos planteados se registraron distintas variables siguiendo el siguiente procedimiento para cada una.

- Concentración de azúcar

Para el análisis de la tendencia de la concentración de azúcar y el efecto del producto químico en el tiempo, fue necesario analizar muestras de jugos, que se obtuvieron en distintas fechas posteriores a la aplicación del madurante, para ello, se colectaron cinco tallos por unidad experimental.

Figura 4. **Muestras de tallos de caña de azúcar**



Fuente: [Fotografía de Hector Monterroso]. (La Gomera, Escuintla. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Las fechas donde se realizó para el análisis de jugos de tallos de caña de azúcar se muestra en el cuadro, a la vez se indica los días después de la aplicación del madurante.

Tabla II. **Fechas de muestreo para el análisis de jugo de los tallos de la caña**

No. Muestreo	1	2	3	4	5	6
Fecha	02-mar	16-mar	23-mar	06-abr	13-abr	27-abr
dda*	6	20	27	41	48	62

*días después de aplicación de madurante.

Fuente: elaboración propia.

- Toneladas de caña por hectárea

Para la estimación del peso de caña cosechada en el área de cada unidad experimental se tomaron el peso por cada unidad experimental dividida entre el área de 144 metros cuadrados y esto se convirtió a peso por hectárea usando la

siguiente conversión.

$$TCH = \frac{PESO EN KG}{144 M^2} * \frac{1 TON}{1000KG} * \frac{10000M^2}{1 Ha}$$

- Muestreo de variables de rebrote

Se consideraron dos variables de desarrollo como lo son la población en diez metros lineales de cultivo y a la vez la altura que corresponde al crecimiento, el muestreo se realizó a los 37 días después del corte en cada unidad experimental, al igual se analizó el contenido de nutricional de manera indirecta, principalmente de nitrógeno, siendo así, se realizó muestreo de hojas midiendo el contenido de unidades relativas de clorofila usando el SPAD 502.

Figura 5. Foto con dron a los 21 días después del corte



Fuente: [Fotografía de Héctor Monterroso]. (La Gomera, Escuintla. 2021). Colección particular.
Guatemala.

Fase 4. Análisis de información

Para el análisis de información se usó el paquete estadístico InfoStat versión 2016, donde se ordenaron los datos para la realización del análisis de varianza, con el propósito de evaluar la homogeneidad de las medias de los tratamientos bajo un diseño experimental de parcelas divididas.

Análisis gráfico

El análisis de variables mediante el uso de gráficos de puntos, de cajas o densidad de puntos, permiten conocer las posibles interacciones de los factores o tratamientos al medir el efecto en las variables de respuesta. Es un análisis preliminar que puede anticipar el resultado del análisis de varianza y si es posible inferir sobre el tratamiento de mayor respuesta dependiendo el interés.

Análisis de varianza

Mediante una prueba de hipótesis del comparativo del valor calculado de F y el p-valor, se determinan el efecto de los tratamientos sobre las variables de respuesta

a. Hipótesis planteada para determinar la diferencia en la concentración de sacarosa.

Ho: Todos los valores promedio de concentración de sacarosa son iguales para todos los tratamientos.

HA: Al menos el efecto de un tratamiento en el valor promedio de

concentración de sacarosa es distinto a los demás.

b. Hipótesis planteada para determinar la diferencia en las toneladas de caña por hectárea.

Ho: Todos los valores promedio de toneladas de caña por hectárea son iguales para todos los tratamientos.

HA: Al menos el efecto de un tratamiento en el valor promedio de toneladas de caña por hectárea es distinto a los demás.

c. Hipótesis planteada para determinar la diferencia en las variables altura, población y contenido de clorofila en el rebrote.

Ho: Todos los valores promedio de altura, población y contenido de clorofila son iguales para todos los tratamientos.

HA: Al menos el efecto de un tratamiento en el valor promedio de altura, población y contenido de clorofila es distinto a los demás.

d. Hipótesis planteada para determinar la diferencia en las toneladas de azúcar por hectárea.

Ho: Todos los valores promedio de toneladas de azúcar por hectárea son iguales para todos los tratamientos.

HA: Al menos el efecto de un tratamiento en el valor promedio de toneladas de azúcar por hectárea es distinto a los demás.

Decisión para determinar la diferencia significativa entre los tratamientos evaluados.

Rechazar Ho. En caso el valor F mayor o igual que p-valor crítica (grados de libertad tratamiento; grados de libertad del error; α)

No Rechazar Ho. Sí el valor de $F < p$ -valor (gl trat; gl error; α) (López,

2008, p. 123).

Pruebas *post hoc*

Una vez determinada la significancia, se realizaron pruebas múltiples de medias para determinar las diferencias entre tratamientos para ordenarlos en función a la respuesta de interés.

Se usaron las pruebas:

- Comparaciones de medias de HSU
- Comparaciones de medias LSD
- Comparaciones de medias Tukey

Finalmente se usaron la prueba comparativa de media de LSD por la potencia y las diferencias mínimas que fueran significativas para determinar el mejor tratamiento según el interés de la variable de respuesta.

Verificación de supuestos

Los residuos resultantes del análisis de varianza, que es la diferencia entre la respuesta observada versus lo predicho.

- Normalidad: Kolmogorov-Smirnov y análisis gráfico con qq-plot.
- Igualdad de varianza: análisis gráfico a través de la dispersión de residuos y predichos con un comportamiento aleatorio.
- Independencia: análisis gráfico.

Fase 5. Interpretación de información

El análisis de varianza ayudó a definir si era necesario el realizar una prueba post hoc para discriminar el tratamiento con mayor concentración de azúcar en relación con el nivel de humedad en el suelo y tipo de maduración.

Para la interpretación se usó la experiencia obtenida en la aplicación de madurantes en distintos ensayos, con diversas variedades, así como el efecto del riego en la maduración en función a criterios técnicos como lo es el déficit permitido de manejo.

Fase 6. Elaboración de informe final

Se redactó el documento con las conclusiones al terminar de recopilar la información analizada.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio de investigación es un trabajo que sistematiza las alternativas enfocadas en mejorar la producción de azúcar por hectárea, como lo son la evaluación de productos químicos como madurantes de la caña y el manejo de niveles de humedad de suelo para acelerar la concentración de sacarosa.

El objetivo general consistió en evaluar el nivel de humedad del suelo y tipo de maduración en la variedad CG02-163, a través de un diseño experimental en parcelas divididas, para conocer el efecto sobre la concentración de sacarosa por tonelada, toneladas de caña y rebrote, esto referente a cañas que se cosechan en abril.

Esto, porque el cultivo de caña de azúcar en Guatemala es de importancia por ser fuente generadora de divisas al país, exportando azúcar a nivel mundial, siendo de gran beneficio al país el incrementar este ingreso, para ello es necesario incrementar el área cultivada o mejorar la producción de azúcar por hectárea, la última es la opción más viable por la disminución del área cultivable, permitiendo mantener la competitividad a nivel mundial.

La aplicación diseño experimental en “parcelas divididas”, ayudó a evaluar los siguientes factores; el primero la humedad del suelo bajo tres niveles, siendo; 40,50 y 60 por ciento de consumo, y el segundo dos tipos de maduración de la caña, siendo; natural y química. En Guatemala a través del desarrollo de variedades por parte del Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación en Caña de azúcar (Cengicaña), se han liberado variedades más productivas,

siendo una de ellas la variedad CG02-163, por lo que, esta se eligió para la evaluación. El enfoque de la presente investigación es cuantitativo y explicativo, porque está constituido por variables como lo son; la concentración de sacarosa, las toneladas de caña por hectárea al momento del corte y el desarrollo de rebrote después del corte, bajo estos resultados se definió el mejor tratamiento sobre el nivel de humedad y tipo de maduración.

Se observó mediante los análisis de varianza con un p-valor < 0.10 , que la concentración de sacarosa mejora al usar madurante respecto a la maduración natural, las toneladas de caña por hectárea fueron superiores al usar la maduración natural 7.94 toneladas más, respecto al uso de madurante, esto por la cosecha a los 62 días después de la aplicación del producto que regulan el crecimiento de la caña y es posible un deterioro por estar fuera de rango óptimo de la cosecha, el resumen de estas variables se determinó en las toneladas de azúcar por hectárea donde la maduración natural en promedio estuvo con 0.81 TAH superior respecto al aplicar madurante, siendo la mayor respuesta de TAH con un manejo de humedad hasta el 60 por ciento de consumo y madurez natural, esto también es confirmado por el desarrollo del rebrote en población y altura.

El estudio tuvo factibilidad financiera, porque se estableció en finca de ingenio Magdalena contando con su apoyo en las labores de campo, para los análisis de suelo y caña se realizaron en el laboratorio agroindustrial de CENGICAÑA como parte de proyectos de investigación de mejoras de prácticas de riego.

En el informe final del estudio se estructura en tres capítulos, que corresponde el primero a la descripción del marco referencial y marco teórico, donde se realizó la revisión de diseños de experimentos y su aplicación respecto al estudio propuesto, la revisión de estudios realizados respecto a la maduración

de la caña de azúcar desde el punto de vista fisiológico, manejo de riego y otras actividades. El segundo capítulo, corresponde al desarrollo de la investigación en la maduración de la caña de azúcar y la presentación de resultados donde se expone las variables de respuesta. Así mismo el capítulo tercero, la discusión de resultados del estudio a través de la estadística, para fundamentar, concluir y recomendar respecto al interés del estudio.

1. MARCO REFERENCIAL

La aplicación de diseños experimentales en estudios agrícolas es de importancia ya que en la mayoría de investigaciones realizadas para inferir sobre la respuesta de las variables de interés están evaluadas bajo esta técnica estadística, el uso de la misma permite determinar factores que son estadísticamente significativos, con dos propósitos; el primero para pruebas posteriores y niveles a evaluar y el segundo para conocer dentro de los tratamientos evaluados cual es el mejor respecto al objetivo del estudio. Por lo que fue necesario documentar las pruebas realizadas donde usan los diseños experimentales para el manejo del riego y tipo de maduración en el cultivo, con el objetivo de orientar el planteamiento de estudios y a la vez fundamentar los resultados para su discusión.

El aumento de la producción de toneladas de azúcar en Guatemala ha mejorado en el tiempo, siendo atribuido a la realización de actividades de manejo agronómico como lo son; las aplicaciones de productos químicos para acelerar la madurez del cultivo, el manejo del riego en la etapa de maduración y principalmente el mejoramiento genético de materiales vegetales que ha sido el factor determinante para el incremento de producción. Además de lo descrito anteriormente, las variedades entre sí difieren en la curva de maduración, aun estableciéndose en las mismas condiciones ambientales y de suelo, esto lo demuestran los resultados del estudio en cuatro genotipos realizado por Pereira, *et al.*, (2017), por lo que los estudios experimentales permiten establecer la curva por variedad para garantizar una mejor materia prima.

Méndez, *et al.*, (2016), menciona que para mejorar la acumulación de azúcar en los tallos de la planta es necesario que se someta a un estrés hídrico antes del corte, esto provoca que disminuya el desarrollo vegetal y por ende ayude a la acumulación. Para el desarrollo del estudio fue necesario evaluar días de suspensión del riego antes del corte como una manera de variar los niveles de estrés de la planta, esperando encontrar una relación del estrés ocasionado a la planta y el efecto en la concentración, así mismo se evalúa en dos materiales vegetales, por lo tanto se usó el diseño de bloques al azar donde se evaluaron dos variedades y cinco periodos de suspensión del riego, las respuestas obtenidas fueron a nivel fisiológico donde se midió la conductancia estomática, tasa de transpiración y tasa fotosintética.

Entre los resultados es importante resaltar la significancia en el análisis de varianza entre los tratamientos y variedades, por lo que se concluye que el estrés ocasionado dependerá del material vegetativo, así mismo las condiciones en campo, por lo que la sensibilidad se atribuyó al periodo indicado en la suspensión de riego previo al corte.

Es necesario hacer énfasis que el periodo de suspensión de riego al que se somete el cultivo con relación a condiciones de manejo, cuando no son ideales se manifiesta en cambios fisiológicos como la transpiración y fotosíntesis, que son determinantes para la producción. esto se interpreta que no necesariamente se debe de generalizar que el estrés hídrico ocasionado por los niveles de humedad de suelo, en el periodo de suspensión tenga el mismo efecto para todos los materiales vegetativos evaluados, como lo mostrado en este estudio, aún no se determina el nivel de estrés donde se afecta la concentración de azúcar o producción de toneladas de caña.

Araújo *et al.*, (2016) de igual manera que en el estudio anterior, también

se evaluaban los periodos de suspensión del riego para evaluar el efecto del estrés hídrico y la necesidad de riego, debido a que no llueve en la fase de maduración del cultivo en la localidad de estudio, siendo necesario la aplicación del riego para que no conlleve a la reducción de la producción de biomasa o toneladas de caña al momento de la cosecha, el estudio se realizó bajo un diseño experimental de parcelas divididas donde se evaluaron como parcelas los días de suspensión del riego y como subparcelas cinco periodos de evaluación de la producción, además se registraron las temperaturas del día para analizar el efecto de la temperatura en la acumulación de azúcar, principalmente la temperatura mínima del día, porque si es demasiado baja para el cultivo produce la disminución de la actividad metabólica y por lo tanto el desarrollo del cultivo.

Entre el manejo de los tratamientos se midió la humedad de suelo para conocer el nivel de estrés al que fue sometido, la conclusión en relación con los tratamientos de días de suspensión de riego evaluados en el material TC4 en San Antonio de Goiás en Brasil, mostraron que los mejores resultados de calidad de materia prima ocurrieron al suspender el riego durante 30 días antes de la cosecha y que el rendimiento en toneladas de caña estuvo asociado a la cantidad de humedad disponible en el suelo, a la vez se determinó que el déficit hídrico de aproximadamente 38 mm es el límite crítico donde inicia a disminuir la producción de toneladas de caña. Los aportes en relación con el estudio permiten considerar los registros de la temperatura del día durante el periodo de evaluación, a la vez el seguimiento de humedad para determinar el déficit y su relación con la acumulación de azúcar.

Castro, *et al.*, (2009), indican que el manejo del riego antes del corte es rentable en áreas que se cosechan en el tercer tercio de zafra, con altos porcentajes de arena y arcilla en el suelo. En este sentido realizaron estudios

de validación de programas de manejo del riego antes del corte o comúnmente conocido en la agroindustria de Guatemala como riego precorte, el estudio se desarrolló en áreas cultivadas donde se tiene programado el corte en los meses; marzo y abril, con predominancia de arenosa y arcilla en el suelo, donde se obtuvieron resultados prometedores porque se incrementó entre 27 y 15 toneladas de caña en suelos arenosos y arcillosos respectivamente, además de ello mencionan que existe efectos positivos en el desarrollo de la población y vigor del cultivo dos meses después del corte (rebrote).

También otra de las consideraciones para tomar en cuenta en el estudio, es la necesidad de cuantificar el posible aumento de la humedad disponible del suelo por la presencia de aporte capilar, las ocurrencias de lluvias y el costo del sistema de riego, siendo como criterio fundamentales para establecer el estudio; el tipo de suelo, el mes de corte, el estrato altitudinal, además siendo de importancia las mediciones de humedad de suelo para cuantificar posibles aportes de lluvia o capilaridad, que afecten el definir el déficit hídrico por tratamiento y a la vez la consideración del costo del sistema para la generación de recomendaciones.

Castillo y Silva (2004), mencionan que la producción de azúcar se acumula en los tallos a causa de las hojas, y las variaciones de cantidad de azúcar son principalmente por el recurso genético y el ambiente donde se cultiven. Es fundamental mencionar que el azúcar se almacena de la parte baja disminuyendo hacia la parte alta del tallo, esto se debe porque se mantiene en constante crecimiento, este almacén de azúcar puede ser usado por la planta para continuar su crecimiento cuando no existan condiciones para realizar fotosíntesis, por lo que la madurez de la caña está en función de la edad, humedad, así como también la influencia de factores climáticos como: luz, temperatura, lluvia y humedad, generalmente asociado a las bajas

temperaturas con mayor acumulación de radiación en el día que favorece la concentración de sacarosa. Lo mencionado por los diferentes autores es importante a considerar para entender los posibles resultados afectados por el comportamiento fisiológico de la caña, esto ayuda para plantear la mejor estrategia para mejorar la concentración de sacarosa.

De acuerdo con Heerden *et al.*, (citado en Morales *et al.*, 2015), hacen saber que el uso de madurantes químicos cuentan con la ventaja de provocar el aumento de concentración de azúcar en la caña y la planificación de la cosecha, siendo los incrementos diferentes para cada variedad respecto al producto y dosis usada, por lo que se plantea el estudio en franjas divididas con cuatro repeticiones, con dos factores; siendo el primero la variedad y el segundo el madurante.

Las variables de respuesta propuestas fueron el incremento de acumulación de azúcar, la pureza del jugo y en consecuente el efecto del producto químico en el rebrote del cultivo. Entre los resultados obtenidos se observa diferencia en respuesta de dosis y tipo de producto químico usado como madurante y a la vez se identifican efectos en el desarrollo posterior al corte del cultivo. Este estudio ayuda a conocer que la concentración de sacarosa estará influenciada por la variedad en respuesta al madurante y dosis aplicada, además de ello es importante determinar el incremento del costo por labores posteriores al corte, como por ejemplo la resiembra a causa de efecto residual del producto químico usado para acumular sacarosa.

Además de las variables mencionadas, también es importante la relación de variables climáticas en el periodo de producción de azúcar como lo menciona Castro (2012), donde analizó información de contenido de azúcar y las variables de lluvia y temperatura mínima, el estudio se concentró en

analizar la temperatura mínima, donde le permitió inferir sobre la relación o asociación por medio del coeficiente Pearson, los resultados obtenidos donde se muestra que la variable temperatura mínima promedio previa antes del corte se obtuvieron coeficientes superior de 0.70. Indicando que, al aumentar un grado de temperatura mínima, el rendimiento disminuye más de diez libras de azúcar por tonelada. Este análisis permitió concluir que la temperatura mínima promedio 30 días antes del corte, mejora el contenido de azúcar durante la maduración del cultivo. Siendo importante la consideración de la variable de temperatura como factor ambiental que afecta el contenido de sacarosa de los tratamientos a evaluar.

López y Quaresma, (2012), menciona sobre el efecto del manejo del riego y aplicación de productos químicos para mejorar el contenido de azúcar, partiendo de la premisa que al realizar aplicaciones en el primer y segundo tercio de cosecha es decir de diciembre a febrero, no causa efectos en la mejora del contenido de azúcar y que el problema podría radicar en el bajo contenido de humedad al momento de las aplicaciones, mismo que genera estrés fisiológico, manifestándose en el lento aprovechamiento del producto químico.

Entre los resultados menciona que no existe efecto independiente el número de riegos previo o posterior al aplicar el acelerador de maduración y así mismo la concentración fue mayor, cabe mencionar que los criterios de estudio fueron; la variedad CP72-2086 y altitud de 300msnm, por lo que en función a este estudio se esperarían evaluaciones a la altitud menor a los 100 msnm donde existe una menor ocurrencia de lluvias aisladas, mayor acumulación de radiación diaria y por lo tanto mayor efecto de la humedad del suelo a causa del riego, haciendo a que exista una mayor concentración de sacarosa en parcelas con aplicación de producto químico independiente del

nivel de humedad de suelo.

Espinoza *et al.*, (2020), durante la evaluación de productos químicos que sustituyan el uso de glifosato, mismo usado para la concentración de sacarosa.

La evaluación se realizó en dos experimentos con diseño en bloques al azar con cuatro repeticiones, con un tamaño de parcela de 15 metros de ancho por 50 metros de longitud, donde se pretendió obtener variables de respuesta del jugo de caña, para lo cual se colectaron muestras conformadas por seis tallos maduros que posteriormente se analizaron en laboratorio para determinar el porcentaje de Brix, porcentaje de Pol y pureza, parámetros que se utilizan para el cálculo de rendimiento de azúcar por tonelada de caña cultivada, en este estudio también se evaluó el nivel de efecto del madurante el en rebrote.

Los resultados fueron satisfactorios en el incremento de sacarosa y disminución del efecto residual en el rebrote de los productos evaluados.

La parte metodológica de la realización de los experimentos sirve de referencia para la construcción del diseño adecuado, el número de repeticiones, el tamaño de la parcela y de la misma manera el tamaño de muestra de tallos para concretar un análisis de jugos para determinar la acumulación de sacarosa.

En el estudio realizado por León y Villatoro, (2017), usaron imágenes satelitales gratuitas para estimar el índice NDWI que indica el nivel de agua en el cultivo, principalmente para determinar el nivel de humedad en las hojas. Al analizar la variable humedad de hoja de caña y el índice NDWI se obtuvo el

coeficiente de determinación arriba del 84 por ciento, por lo tanto, esto conlleva a interpretarse que el modelo generado permite obtener una estimación cercana del valor real de humedad de la caña según el valor de índice NDWI, este tipo de estudio es de importancia porque permite definir el nivel de humedad del cultivo previo aplicar el producto químico como madurante y así mismo conocer el valor de humedad previo a la cosecha, para posteriormente interpolar los resultados sobre el manejo de humedad en la fase de maduración del cultivo.

Es importante resaltar que el estudio propuesto debe fundamentarse en la estadística, como se menciona en algunos de los estudios consultados, donde se usaron los diseños experimentales, para evaluar los días de suspensión del riego y maduración, con el propósito de determinar la significancia por medio del análisis de varianza.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos estadísticos

En este apartado se fundamenta el análisis de los datos que se obtiene de la experimentación siendo este caso diseño en parcelas divididas para conocer los efectos de los tratamientos propuestos.

2.1.1. Diseños y análisis de experimentos

Montgomery, (citado por López, 2008), menciona que los experimentos son considerados como pruebas o ensayos, con el propósito de identificar las respuestas al modificar algunas de las variables de manejo.

Para el caso de diseño de experimentos, según el autor consultado es necesario seguir una serie de pasos para obtener información que permita aceptar o rechazar las hipótesis planteadas(s), Nogueira (Citado por López, 2008). La misma secuencia se enlista a continuación.

- Enunciado del problema con formulación de hipótesis (no en términos estadísticos)

Las hipótesis deben de ser planteada en primer lugar en términos científicos y luego con un planteamiento estadístico, por lo tanto, debe existir congruencia entre las dos hipótesis.

- Identificación de factores y niveles de estudio
Los factores son condiciones para evaluar, esperando que afecten los

resultados de las variables de estudio. Se puede definir como un factor a cada variable independiente, con el propósito de evaluar el efecto. Son consideradas alternativas el evaluar los factores en niveles. El nivel puede ser tipo cualitativo o cuantitativo.

- Unidad experimental

Generalmente el área de cada unidad experimental para evaluaciones en caña de azúcar está comprendida dentro de 75-90 metros cuadrados (conformada por seis o cinco surcos con longitud de diez metros).

- Medición de variables

Para definir las variables a medir es necesario que respondan a los objetivos, por tanto, las mediciones que se realicen en las unidades experimentales posteriormente a la aplicación de tratamientos mostrarán diferentes resultados en las variables de respuesta que ayudarán a definir el efecto del nivel y factor.

- Elección de diseño

Eso conlleva conocer dos aspectos como lo menciona Martínez (citado por López, 2008), primero, identificar los factores y niveles y luego la aleatorización en el campo de acuerdo con la gradiente de variación, posterior a ello se define el diseño a plantearse que permite ayudar a cuantificar la varianza y conocer la significancia a través de repeticiones.

- Análisis estadístico

La herramienta estadística atribuida a Fisher que permite estudiar el efecto de los tratamientos en función a las variaciones causadas en las variables de respuesta es conocida como varianza, permitiendo identificar la significancia de las fuentes de variación para un posterior análisis de pruebas múltiples de

medias.

2.1.1.1. Diseño experimental parcelas divididas

Tuvo origen en la agricultura y es ampliamente usado en estas líneas de investigación, según literatura, el mismo surge por una restricción particular para aleatorizar el orden de corrida de los tratamientos como lo mencionan. (Pulido *et al.*, 2012)

Claramente puede ser usado en otras condiciones y no necesariamente tiene que estar establecidos en campos agrícolas, la idea principal en este diseño, debe existir un factor con menos niveles en este sentido las parcelas y otro con mayor niveles subparcelas por lo que existirá tratamientos que se tienen que aplicar de manera aleatoria a unidades experimentales grandes (parcelas), y habrá otros tratamientos que se pueden aplicar al azar en unidades experimentales pequeñas (subparcelas), que resultan al dividir las primeras.

- Modelo estadístico aplicado al diseño experimental

El estudio propuesto se estudiará dos tipos de maduración siendo estas; natural ó inducida por productos químicos y cinco niveles de humedad de suelo, los primeros como parcelas y los segundos como subparcelas. En este sentido los niveles de humedad se aplicarán de manera aleatoria entre los tipos de maduración. Según este autor el acomodo de los factores de parcela y subparcela da lugar a un análisis particular.

- Modelo estadístico

En general hay dos factores de interés, A (parcela) y B (subparcela) con a y b niveles, pero ahora las r repeticiones de las parcelas son los niveles de un factor de bloques que denotamos por r. Con estas consideraciones el modelo

estadístico queda como:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \rho_k + (\alpha\rho)_{ik} + \varepsilon_{ijk}$$
$$i = 1, 2, \dots, a$$
$$j = 1, 2, \dots, r$$
$$k = 1, 2, \dots, b$$

(Ec.01)

Siendo:

Y_{ijk} = Variable de respuesta medida en la ijk - ésima unidad experimental

μ = Media general

β_j = Efecto del j - ésimo bloque

α_i = Efecto del i - ésimo nivel del factor A.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = Efecto de la interacción del i -ésimo nivel del factor A con el j - ésimo bloque, que es utilizado como residuo de parcelas grandes y es representado por error(a)

ρ_k = Efecto del k - ésimo nivel del factor B

$(\alpha\rho)_{ik}$ = Efecto debido a la interacción del i -ésimo nivel del factor A con el k - ésimo nivel del factor B.

ε_{ijk} = Error experimental asociado a Y_{ijk} , es utilizado como residuo a nivel de parcela pequeña, y es definido como: Error(b)

Hipótesis

$H_0: \mu_1 = \dots = \mu_a$,

contra

$H_0: \mu_1 = \dots = \mu_k$ contra

$H_a: \text{por lo menos } \mu_i \neq \mu_{i'} \text{ para } i \neq i'$;

$H_a: \text{por lo menos } \mu_k \neq \mu_{k'} \text{ para } k \neq k'$;

$H_0: \mu_i \cdot k - \mu_i - \mu_k + \mu = 0$, contra

$H_a: \mu_i \cdot k - \mu_i - \mu_k + \mu \neq 0$ para algún i y

k

Tabla III. **Presentación de la información previa al análisis**

Tratamiento primario	Trat. Secundario	Bloques			Y i. k
		I	II	III	
A ₁	B ₁	Y ₁₁₁	Y ₁₂₁	Y ₁₃₁	Y _{1.1}
	B ₂	Y ₁₁₂	Y ₁₂₂	Y ₁₃₂	Y ₁₁₁
	B ₃	Y ₁₁₃	Y ₁₂₃	Y ₁₃₃	Y ₁₁₁
Total, parcela grande		Y _{11.}	Y _{12.}	Y _{13.}	Y ₁₁₁
A ₂	B ₁	Y ₂₁₁	Y ₂₂₁	Y ₂₃₁	Y ₁₁₁
	B ₂	Y ₂₁₂	Y ₂₂₂	Y ₂₃₂	Y ₁₁₁
	B ₃	Y ₂₁₃	Y ₂₂₃	Y ₂₃₃	Y ₁₁₁
Total, parcela grande		Y _{21.}	Y _{22.}	Y _{23.}	Y ₁₁₁
Total, bloques		Y _{.1.}	Y _{.2.}	Y _{.3.}	Y ₁₁₁

Fuente: López, (2008). *Diseños y análisis de experimentos.*

Cuadro de análisis de varianza.

Tabla IV. **Planteamiento del análisis de varianza**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F
Bloques	r-1	$\sum_{j=1}^r \frac{Y_j^2}{ab} - \frac{Y^2}{arb}$		
A	a-1	$\sum_{i=1}^a \frac{Y_i^2}{rb} - \frac{Y^2}{arb}$	SC_A/gl_A	$CM_A/CM(a)$
Error (a)	(a - 1) (r - 1)	SCsubt - SCbloque - SCA	SC(a)/GL(a)	
Subtotal	ra - 1	$\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^a \frac{Y_{ij}^2}{b} - \frac{Y^2}{arb}$		
B	b-1	$\sum_{k=1}^b \frac{Y_k^2}{rb} - \frac{Y^2}{arb}$	SC_B/gl_B	$CM_B/CM(b)$
AB	(a - 1) (b - 1)	$\sum_{j=1}^r \sum_{k=1}^b \frac{Y_{jk}^2}{r} - \frac{Y^2}{arb}$ - SC_A - SC_B	SCAB/GLAB	CMAB/CM(b)
Error(b)	a (b - 1) (r - 1)	SCTot - Scsubt - SCB - SCAB	SC(b)/GL(b)	
Total	abr-1	$\sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^b Y_{ijk}^2 - \frac{Y^2}{arb}$		

Fuente: López, E. (2008). *Diseños y análisis de experimentos*.

Regla de decisión

Rechazar H_0 . En caso el valor F mayor o igual que F crítica (grados de libertad tratamiento; grados de libertad del error; α)

No Rechazar H_0 . Sí el valor de $F < F$ crítica (gl trat; gl error; α).

2.1.2. Validez de supuestos del análisis

Menciona que el ANOVA puede estar sujeto al cumplimiento de supuestos como lo es la; independencia, distribución normal y varianza constante, siendo estos validados en los residuos, mismos que son resultado de la diferencia entre la respuesta observada versus la predicha. Esta dada por la ecuación 02. (Pulido *et al.*, 2012)

$$e_{ij} = Y_{ij} - \hat{Y} = Y_{ij} - \bar{Y}_i \text{ (EC. 02)}$$

Normalidad

Este supuesto se puede verificar al graficar los residuos para analizar si siguen una distribución normal, esto se constata si la dispersión sigue la tendencia de una recta. Existe una prueba estadística para verificar si siguen una distribución normal mediante Shapiro-Wilks donde se plantean las hipótesis:

H_0 : Datos con distribución normal.

H_A : Datos sin distribución normal.

Los pasos al realizar la prueba, primero se ordenan de mayor a menor, luego, se obtiene coeficientes dados a_1, a_2 hasta a_k , donde k es $n/2$, posteriormente se estima el estadístico W, definido por la ecuación, donde S^2 es la varianza de la muestra y por último se compara donde el valor calculado es superior al valor crítico al nivel de α .

$$W = \frac{1}{(n-1)S^2} \left[\sum_{i=1}^k a_i (X_{(n-i+1)} - X_{(i)}) \right]^2 \text{ (EC. 03)}$$

Varianza constante

Esto se verifica al generar la dispersión entre predichos contra residuos (\hat{Y}_{ij} vs. e_i), por lo general los predichos se grafican en el eje “X” y los residuos en el eje “Y”. Si los datos se no siguen ningún patrón de distribución, por tanto, se considera que se cumplen donde los tratamientos tienen igual varianza. Pulido *et al.*, (2012).

Independencia de residuos

Este supuesto se valida al generar la dispersión del orden en relación con los residuos, ordenándose como x, y respectivamente, el objetivo es detectar un comportamiento aleatorio y en función a ello, se indica si cumple con la independencia, por tanto, si existe un comportamiento aleatorio se cumple. La falta de cumplimiento se podría considerar que no se dio el manejo adecuado al experimento. Pulido *et al.*, (2012).

2.1.3. Prueba Post Hoc

Prueba HSD

La prueba de diferencia honestamente significativa (HSD por sus siglas en inglés) permite la comparación estadística del valor medio del tratamiento, por tanto, permite inferir sobre las diferencias, es decir aceptándose la hipótesis alternativa. Dagnino., (2014).

$$(y_i. - y_j.) - \text{HSD} \leq \mu_i - \mu_j \leq (y_i. - y_j.) + \text{HSD}, \text{ (EC. 04)}$$

$$HSD = q\alpha; I, N-I \sqrt{\frac{S_R^2}{n}}. \quad (\text{EC. 05}),$$

Donde N, corresponde a la cantidad de observaciones, t es cantidad de dosis o niveles del factor, n tamaño muestral, S_R^2 la varianza estimada del error, y_i, y_j medias muestrales de i y j, qt, N-t (α) distribución de intervalo estudentizado en los parámetros t grupos y N-t corresponde a grados de libertad y nivel de significancia, por lo tanto, si en el intervalo no incluye el cero se determina las diferencias significativas entre el valor medio de μ_i y μ_j . Dagnino (2014), menciona que la prueba de Tukey es exacta en el ajuste de α al 5 % y que la misma es aplicable para grupos de igual tamaño.

Diferencia mínima significativa

Primeramente, las hipótesis se plantean si las medias son iguales, para ello, se calcula la diferencia en valor absoluto entre las medias muestrales $|\bar{Y}_i - \bar{Y}_j|$. Si se cumple la ecuación 06, se debe rechazar la hipótesis planteada como nula $\mu_i = \mu_j$, si se cumple la siguiente ecuación.

$$LSD = |\bar{Y}_i - \bar{Y}_j| > t_{\frac{\alpha}{2}, N-k} \sqrt{CM_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)} \quad (\text{EC. 06})$$

Se denomina así porque es la diferencia mínima significativa que debe existir entre dos medias muestrales para considerar que los tratamientos son significativamente diferentes. Lo cual se reduce en la ecuación siguiente.

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, N-k} \sqrt{2CM_E/n} \quad (\text{EC. 07})$$

El método LSD tiene una potencia importante, porque a pesar de existir diferencias pequeñas en ocasiones la declara estadísticamente significativas.

Prueba de Tukey

Consiste en comparar las diferencias entre los valores medios muestrales con el valor crítico dado, se declara diferentes cuando las pares de medias donde el valor absoluto es mayor a $T\alpha$ a diferencia con la prueba LSD, trabaja con un error α muy cercano al declarado por el experimentador.

$$T\alpha = q\alpha(k, N - k)\sqrt{CM_E/ni} \text{ (EC. 08)}$$

Donde k es la cantidad de tratamientos, $N-k$ se obtiene los gl y n son la cantidad de observaciones y el alfa siendo la significancia prefijada y el estadístico $q\alpha(k, N - k), CM_E$. Pulido *et al.*, (2012).

2.2. Manejo agronómico en maduración de caña de azúcar

Este apartado corresponde a las actividades agrícolas que se realiza durante la fase final del cultivo, ya sean estas; riego para mantenimiento de la biomasa y la aplicación de químicos para la maduración, la cual se describen a continuación.

2.2.1. Maduración

Castro (2012), menciona que el cultivo tiene principalmente cuatro etapas fenológicas, que se ordenan; iniciación, macolla miento, elongación y maduración, con una duración promedio de 45, 90, 180 y 50 días respectivamente.

Principalmente en la última etapa existen cambios fisiológicos en el tallo, siendo estos; disminución del crecimiento diario y acumulación de sacarosa, en países productores de azúcar la época marca la temporada de cosecha, en el caso particular de Guatemala, el periodo de corte empieza en el mes de noviembre y termina en mayo del siguiente año. Según Buenaventura, el aumento de sacarosa en el jugo obtenido de los tallos depende de factores como; la humedad en el suelo, temperatura mínima de 15 grados centígrados y luminosidad de 11.5 a 12.5 horas luz, estas condiciones deben presentarse de 28 a 42 días antes del corte. (Espinoza, 2012)

2.2.1.1. Maduración natural

Esta sucede luego de disminuir gradualmente el crecimiento de los tallos lo que contribuye disponer menos humedad en el suelo y bajas temperaturas como lo encontrado en análisis realizado sobre el rendimiento de fincas de Guatemala, donde existía mayores concentraciones cuando la temperatura era inferior a los 18 grados Celsius. (Castro, 2012)

En la publicación de maduración en el libro referente al cultivo, cita varios autores donde menciona que la disponibilidad de azúcar en los tallos es la consecuencia de los aportes del total de sintetizada y la cantidad hidrolizada, por las funciones realizadas por la invertasa acida y neutra, la primera hidroliza y transporta sacarosa del follaje a los entrenudos durante su crecimiento, la segunda, acumula azúcar como sacarosa en entrenudos durante la última etapa del cultivo. En el proceso agroindustrial donde transforma el jugo extraído en azúcar, les interesa que cumpla con ciertos parámetros mínimos del jugo, siendo estos; el 80-85 por ciento de pureza, 14.4 y 15.3 porcentaje de Pol caña (contenido de sacarosa) y los azúcares reductores menor al 1 por ciento (Espinoza, 2012).

2.2.1.2. Maduración química

La aplicación conlleva a los siguientes efectos como; acelerar la maduración, disminuir el crecimiento, incentivar la mejora de concentración del contenido de azúcar, reducir el material vegetal o mineral que no sea caña comúnmente llamado Trash que se envía a fábrica, provocar el desprendimiento de las hojas del tallo consigo mejora la cosecha y la calidad. La tecnología de baja inversión y rentable para acelerar la concentración de sacarosa es el uso de maduradores químicos, que se aplican previo al corte. El potencial estimado es el incremento de azúcar alrededor de 450 kilogramos por hectárea.

Los maduradores usados en Guatemala, funcionan como retardadores ó inhibidores de crecimiento, entre los primeros se puede mencionar el Ethephon y el Trinexapac Etil (Moddus). Los que tienen la función de inhibidores están el Glifosato, Fluazifop-butil y el Cletodim dentro de estos, los dos últimos son utilizados en menor medida y su función se observa a las 48 después deteniendo el crecimiento en los nudos de tallos y sus yemas debido a que afecta el meristemo, estos productos se aplican cuando se necesita a cortar el tiempo de cosecha debido a que logra su máxima concentración luego de los 30 y 40 días después de la aplicación, si se deja más tiempo sin cortar la caña empieza a deteriorarse. La respuesta de la aplicación es favorable para las áreas que se corta en el mes de noviembre y diciembre. (Espinoza, 2012)

2.2.1.3. Efecto de maduración química en el rebrote

Espinoza, (2012), menciona en el capítulo de madurantes, que los efectos pueden estar asociados con la variedad, pero principalmente se puede observar en el crecimiento del tallo donde las diferencias entre lo aplicado y no aplicado a los 30 días después del corte, así como la inhibición de brotación.

2.2.1.4. Beneficios en la producción

Para pagar el costo de aplicación de productos químicos es necesario tener un mínimo de incremento de 83 kilogramos de azúcar por hectárea. En estudios muestra que se obtiene de 270 a 493kg de azúcar por tonelada extra, siendo rentable. En otro estudio comparativo donde se evaluó la maduración química versus la natural, se determinó que son mayores al usar el glifosato y Trinexapacetil, pero específicamente para el material vegetativo evaluado tuvo mayor efecto al usar Trinexapacetil en comparación al no aplicar, al igual que el peso de caña cosechado, por tanto, no existió reducción de peso.

2.2.1.5. Factores para considerar en la aplicación

- Época de aplicación: la aplicación en septiembre y octubre para las áreas que se cosechan en noviembre y diciembre, la aplicación en noviembre y diciembre para las áreas a cosechar en enero y febrero, y por último para las que se cortan en marzo-abril es necesario aplicar en enero y febrero o definirse entre los 30 a 65 días antes del corte.
- Selección del área: material vegetal con producción arriba de las 100 toneladas de peso, áreas sin estrés fisiológico y sin cultivos vecinos, con desarrollo uniforme, entre otros.
- Aeronaves: se usan avionetas y helicópteros, los últimos son los más usados en áreas con topografía irregular.
- Dosis: está definida por la variedad, textura de suelo, número de corte que define si es plantía o soca, para el caso específico del Moddus que su

ingrediente activo es el Trinexapac etil en promedio se recomienda de 1 a 1.2 litros por hectárea. (Espinoza, 2012)

2.2.1.6. Monitoreo de la concentración de sacarosa posterior a la aplicación de madurante

Es necesario el monitoreo del jugo obtenido de toda la planta, siendo requerido realizar muestreos que consiste en realizar una muestra cada 4 ha, donde se cortan cinco tallos óptimos para corte de un metro consecutivo o de una misma macolla, dividiéndolo en tamaños similares hasta un largo de 60 centímetros, luego, se traslada al laboratorio donde se analiza el jugo obteniendo los siguientes resultados; brix, % Pol de caña, azúcares reductores, calculando la pureza, rendimiento comercial y potencial. (Espinoza, 2012).

2.2.2. Manejo de riego en maduración

La aplicación de agua es importante porque incrementa o asegura el peso de los tallos hasta la cosecha principalmente en áreas que se cosechan en los meses de marzo-abril. (Castro, 2012) En suelos de textura franco-arenosa se obtiene incrementos hasta 27 a 36 toneladas, en suelos franco arcilloso de 15 a 28 TCH y aumentando en suelos con contenido alto de arena.

La rentabilidad del manejo del riego se define por el costo de aplicación, la cantidad de milímetros de agua aplicar, así como el número de riegos que dependerá de la textura del suelo y umbral de riego a manejar.

La recomendación consiste en limitar o suspender el riego en un intervalo de 30 a 45 días previo al corte, siendo el propósito favorecer a la caña el movimiento de sacarosa en el tallo. El efecto negativo cuando no se realiza dicha suspensión, la planta usa la azúcar acumulada para realizar actividades

fisiológicas como lo es la división celular estimulando el crecimiento, por lo tanto, con lleva, a reducir la producción de sacarosa. Requiriendo una dosis alta al existir un alto contenido de agua. (Espinoza, 2012)

2.2.2.1. Operación del sistema de riego

Para definir el momento del riego es importante responder dos interrogantes ¿cuándo aplicar? y ¿cuánto aplicar?, la primera se responde dependiendo del consumo del cultivo según la etapa fenológica y los parámetros que afectan la necesidad hídrica y la segunda se responde por la cantidad de agua almacenada en el suelo y el déficit permitido de manejo que ayuda a definir el consumo del agua en el suelo.

Porcentaje de humedad uno está dispuesto que se consume de la humedad en el suelo.

La cantidad de agua almacenada en el suelo necesita de valores de porcentaje de humedad a capacidad de campo(%CC) o máximo porcentaje de agua retenido, punto de marchitez permanente(%PMP) donde la planta se le dificulta extraer el agua y densidad aparente (D.Ap.), esto se integra al usar la ecuación 4, permitiendo conocer el agua disponible total (ADT) y para definir cuanto aplicar en el riego es necesario el conocer el déficit permitido de manejo (DPM) o bien la fracción de agua fácilmente (AFA) aprovechable estas denominaciones son usadas por (Allen *et al.*, 2006)

$$ADT = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r * D.Ap. \quad (EC. 09)$$

$$AFA = ADT * DPM \quad (EC. 10)$$

Donde:

ADT= La disponibilidad de agua total.

θ_{FC} = Contenido de agua a capacidad de campo en 00/100.

θ_{WP} = Contenido de agua a punto de marchitez permanente en 00/100.

Zr= profundidad radicular en m.

D.Ap.= densidad aparente en gramos por centímetro cubico.

AFA= agua fácilmente aprovechable.

DPM= déficit permitido de manejo.

Para caña de azúcar el máximo déficit permitido de manejo es del 60 por ciento, esto considera que del 100 por ciento que puede almacenar el suelo, solo se permitirá que se consuma hasta el déficit fijado.

Este un parámetro definido para cada cultivo como crítico, luego de sobrepasarlo ya existe dificultad porque se condiciona el óptimo desarrollo del cultivo, por efecto de la humedad disponible, ocasionando que la planta para extraer el agua del suelo deba gastar más energía porque la adhesión del agua al suelo es mayor a la capacidad de extracción por la caña, por tanto, esto regula la entrada de agua por las raíces, no satisfaciendo el requerimiento de la transpiración. (Allen *et al.*, 2006).

2.2.2.2. Control de humedad en el suelo

Existen métodos directos e indirectos para conocer la condición de humedad, siendo, el método directo más exacto la humedad gravimétrica, (Castro, 2012). Este valor se obtiene al usar la ecuación 11. Esto permite conocer el porcentaje de consumo de humedad o el déficit permitido manejado.

$$\% \text{Humedad gravimétrica}(Hg) = \frac{PSH - PSS}{PSS} * 100 \text{ (EC. 11)}$$

Donde:

PSH= peso de suelo húmedo

PSS= peso de suelo seco

Siendo así, para el porcentaje de consumo se usa la ecuación 7.

$$\% \text{ humedad consumida} = 1 - \left(\frac{\frac{\% Hg - \% \theta WP}{100}}{\frac{\% \theta FC - \% \theta WP}{100}} \right) * 100 \text{ (EC. 12)}$$

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

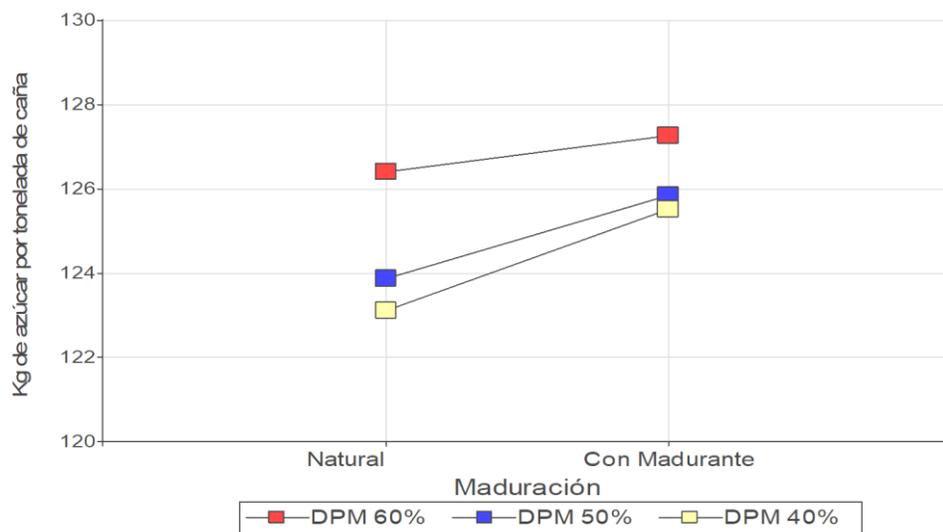
De acuerdo con los objetivos propuestos se presentan los siguientes resultados.

Objetivo 1. Establecer si existe diferencia significativa entre los tratamientos evaluados y la concentración de sacarosa por medio de un análisis de varianza.

3.1. Efecto en la acumulación de azúcar

Antes de conocer el resultado del ANOVA, se analizó gráficamente para conocer el efecto general de la respuesta de la variable kilogramos por tonelada según el efecto del consumo de la humedad y maduración.

Figura 6. Comportamiento de concentración de sacarosa



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

En la figura 6, se analiza el comportamiento de la acumulación de azúcar en los entrenudos de los tallos expuesto a diferentes condiciones de humedad, siendo así que el uso de la maduración química en comparación a no aplicar muestra un aumento de concentración de sacarosa, por tanto, el aplicar madurante aumenta el contenido de azúcar independiente del nivel de humedad.

Tabla V. **ANOVA para la concentración**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	11	177.27	16.14	3.42	0.0224
Maduración	1	18.60	18.60	1.37	0.3258
Maduración*Bloque	3	40.63	13.54	2.87	0.0806
Nivel de humedad	2	28.27	14.14	3.00	0.0880*
Nivel de humedad*Maduración	2	2.63	1.31	0.28	0.7617
Bloque	3	3.00	29.13	6.17	0.0088
Error	12	56.61	4.72		
Total	23	234.14			

Fuente: elaboración propia.

Según el ANOVA de la tabla V se observa que la prueba de Fisher, únicamente para el contenido de humedad, tiene efecto significativo para un p-valor=0.10, siendo así, se rechaza la H_0 planteado donde el manejo evaluado tienen el mismo efecto en la cantidad de kg azúcar/t, por lo que será necesario conocer qué nivel de humedad contribuye a mejorar la acumulación de azúcar.

Tabla VI. **Análisis múltiple de medias LSD Fisher con un $\alpha=0.10$. para el nivel de humedad**

Nivel de humedad	Medias	n	E.E.	Categorización
DPM 60%	126.85	8	0.73	A
DPM 50%	124.87	8	0.73	B
DPM 40%	124.32	8	0.73	B

Fuente: elaboración propia.

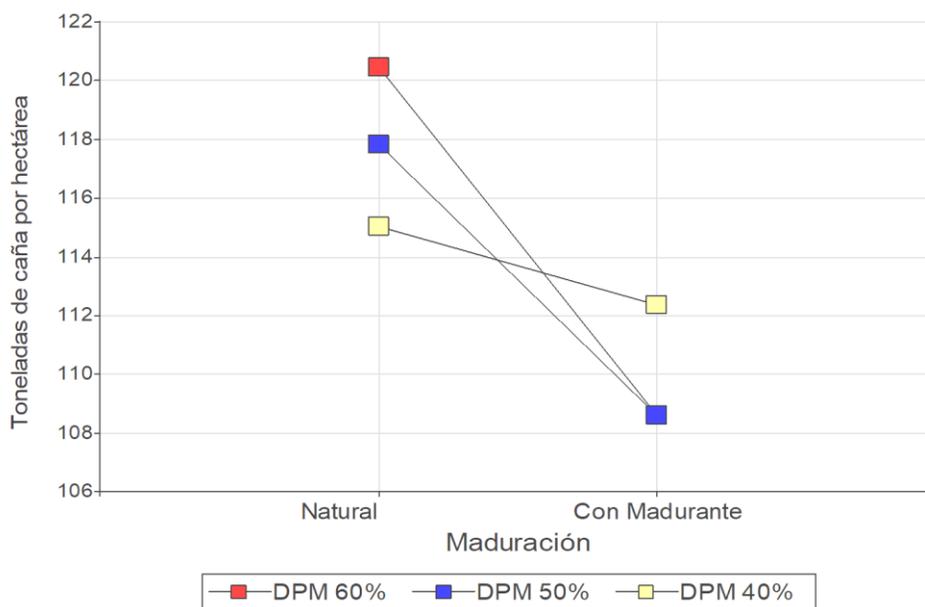
Los resultados de la tabla dos indica, que el tratamiento con mejor concentración de azúcar consiste en manejar la humedad hasta el consumo de 60 por ciento con una media de 126.85 kg azúcar/t.

Objetivo 2. Conocer si existe diferencia significativa entre los tratamientos evaluados y la cantidad de toneladas de caña por hectárea por medio de un análisis de varianza.

3.2. Efecto en las toneladas de caña por hectárea

Igualmente, al objetivo anterior se analizó previamente con un gráfico para mostrar el efecto entre el manejo de niveles de la humedad y maduración.

Figura 7. Comportamiento del TCH



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Se observa el efecto del uso de madurante y sin madurante al estar expuesto a diferentes niveles de humedad, reduce generalmente el TCH al aplicarse madurante, cuando se maneja la humedad en niveles óptimos es decir solo permitir que disminuya un 40 por ciento de humedad. La respuesta de la maduración química es menos en comparación, con los otros niveles de humedad, en donde al aplicar madurante disminuye drásticamente el TCH y así mismo, se observa que se mejora el peso de caña al manejar un consumo máximo del 60 por ciento de la humedad contenida.

Tabla VII. ANOVA para las TCH

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	11	759.01	69.00	1.11	0.4285
Maduración	1	377.23	377.23	5.84	0.0944*
Maduración*Bloque	3	193.70	64.57	1.04	0.4110
Nivel de humedad	2	7.03	3.51	0.06	0.9453
Nivel de humedad*Maduración	2	90.33	45.16	0.73	0.5040
Bloque	3	90.72	30.24	0.49	0.6983
Error	12	746.64	62.22		
Total	23	1505.64			

Fuente: elaboración propia, usando resultados de TCH.

Según el ANOVA presentado en la tabla VII, se observa que los resultados, para los efectos de tipo de maduración y niveles de humedad del suelo, únicamente tienen efecto significativo para una significancia del 10 %, para el tipo de maduración, siendo así, se rechaza la hipótesis nula planteada, donde los tratamientos del tipo de maduración evaluados no generan la misma respuesta en el TCH.

Tabla VIII. Análisis múltiple de medias LSD Fisher con un alfa=0.10

Maduración	Medias	n	E.E.	Categorización
Natural	117.77	12	2.32	A
Con Madurante	109.84	12	2.32	B

Fuente: elaboración propia.

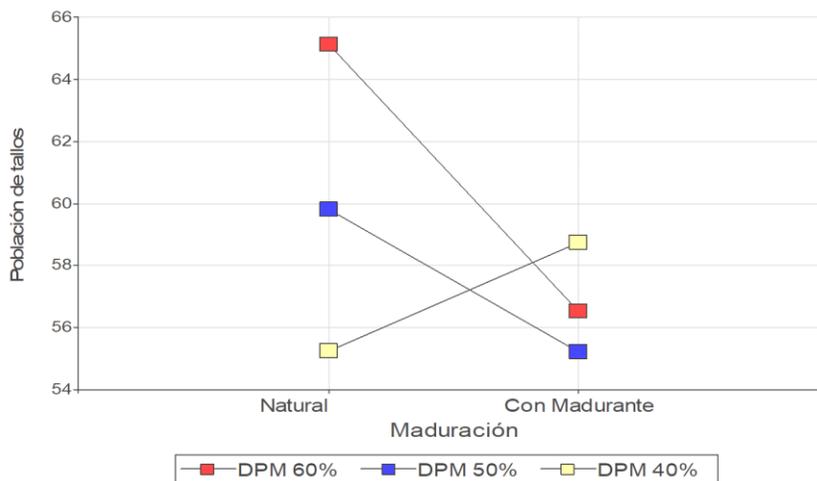
Respecto a la prueba múltiples de medias con un alza del 0.10, reflejan que se obtiene mayor TCH al no aplicar madurante independiente del nivel permitido de consumo de humedad, en el periodo de evaluación de 62 días.

Objetivo 3. Conocer si existe diferencia significativa entre los tratamientos evaluados y rebrote después del corte por medio de un análisis de varianza.

3.3. Efecto en el rebrote

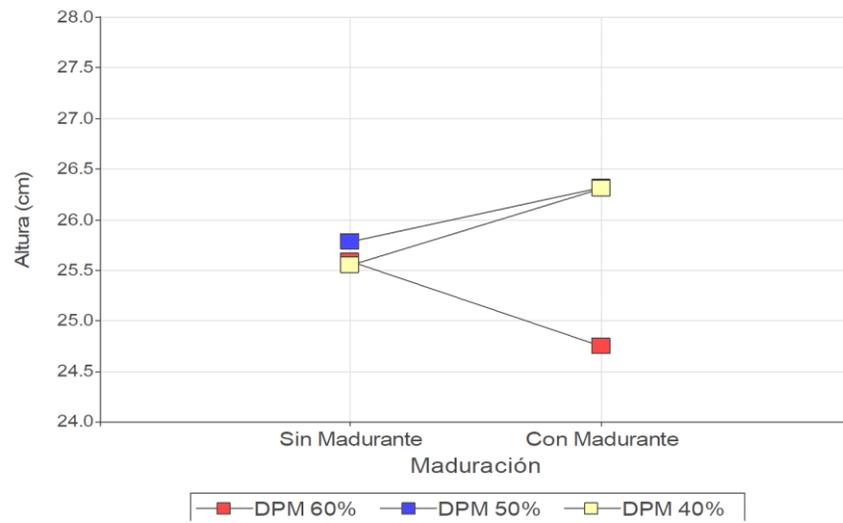
Para el cumplimiento del objetivo planteado del manejo realizado del déficit permitido de manejo y la maduración en el rebrote, se procedió a realizar los análisis de varianza por separado, para las variables altura, población y las mediciones de clorofila del rebrote posterior al corte, como se visualiza en las tablas V, VI y VII.

Figura 8. **Comportamiento de la población**



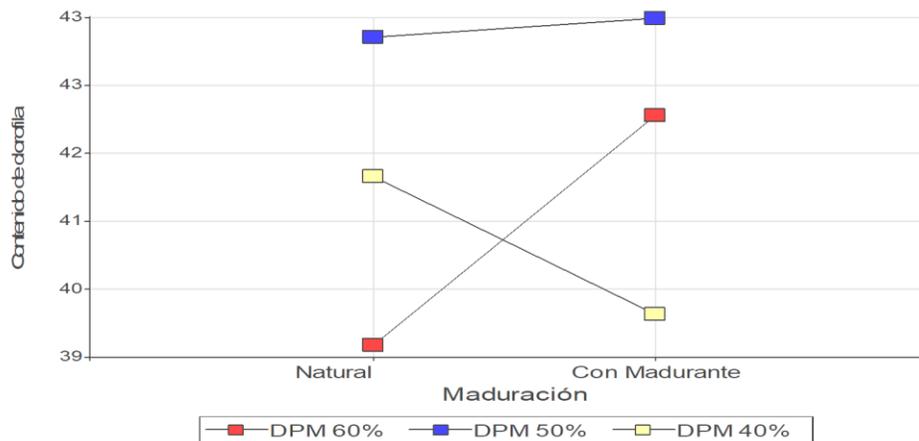
Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Figura 9. Comportamiento de altura



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Figura 10. Comportamiento del contenido de clorofila



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Tabla IX. **ANOVA para altura del rebrote**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	11	147.73	13.43	1.41	0.2829
Maduración	1	0.14	0.14	0.01	0.9385
Maduración*Bloque	3	61.03	20.34	2.13	0.1495
Nivel de humedad	2	3.67	1.83	0.19	0.8278
Nivel de humedad*Maduración	2	3.02	1.51	0.16	0.8556
Bloque	3	79.87	26.62	2.79	0.0861
Error	12	114.58	9.55		
Total	23	262.31			

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **ANOVA para la población del rebrote**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	11	436.91	39.72	2.32	0.0821
Maduración	1	62.34	62.34	3.76	0.1477
Maduración*Bloque	3	49.70	16.57	0.97	0.4400
Nivel de humedad	2	69.24	34.62	2.02	0.1752
Nivel de humedad*Maduración	2	151.33	75.66	4.42	0.0365
Bloque	3	104.31	34.77	2.03	0.1635
Error	12	205.56	17.13		
Total	23	642.48			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. ANOVA para el contenido de clorofila del rebrote

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	11	91.57	8.32	0.71	0.7074
Maduración	1	1.14	1.14	0.09	0.7825
Maduración*Bloque	3	37.53	12.51	1.07	0.3969
Nivel de humedad	2	32.71	16.36	1.40	0.2832
Nivel de humedad*Maduración	2	18.74	9.37	0.80	0.4701
Bloque	3	1.45	0.48	0.04	0.9882
Error	12	139.81	11.65		
Total	23	231.38			

Fuente: elaboración propia.

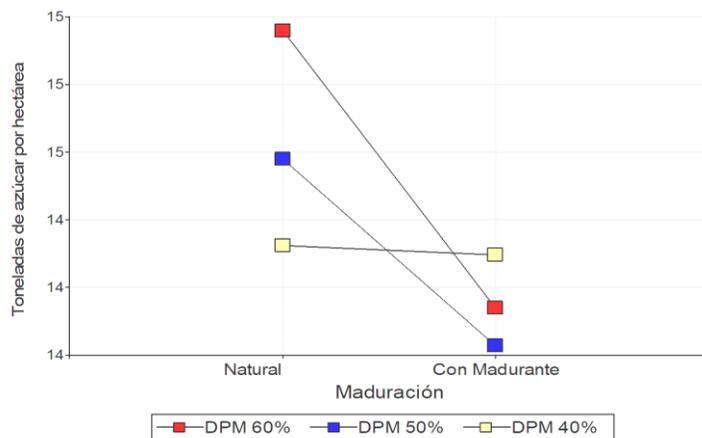
Se puede mencionar en función a la significancia del 10 %, para los análisis de varianza de altura, población y contenido de clorofila en el rebrote, que no existe diferencia en el efecto del nivel de humedad y el tipo de maduración, por tanto, puede aplicarse cualquier combinación de tratamiento.

Objetivo 4. Conocer el tratamiento con mejores resultados de concentración de sacarosa, toneladas de caña por hectárea y rebrote con el menor costo por medio de pruebas *post hoc*.

3.4. Selección del mejor tratamiento

La mejor manera para responder el objetivo es conocer el resultado previamente de las toneladas de azúcar por tonelada, que resumen la interacción de la concentración de azúcar por toneladas por la producción por hectárea

Figura 11. Comportamiento de TAH según la humedad y maduración



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Se puede observar que el resultado final de TAH, que prácticamente es el producto del contenido de azúcar por las toneladas producidas en una hectárea, es significativamente mayor no aplicar madurante y la reducción de humedad hasta un máximo de 60 %, seguido por la reducción de humedad al 50 por ciento y por último al 40 %, siendo este aún superior al combinarse con madurante.

Tabla XII. ANOVA para TAH

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	p-valor
Modelo	11	9.67	0.88	1.01	0.4891
Maduración	1	3.94	3.94	5.63	0.0983*
Maduración*Bloque	3	2.10	0.70	0.81	0.5141
Nivel de humedad	2	0.95	0.47	0.54	0.5935
Nivel de humedad*Maduración	2	1.93	0.97	1.11	0.3606
Bloque	3	0.74	0.25	0.28	0.8362
Error	12	10.43	0.87		
Total	23	20.09			

Fuente: elaboración propia.

La única diferencia estadística con un p -valor=0.10 es para el tipo de madurante que consistía entre sí y no aplicar, lo que indica que si existe diferencia significativa por lo que será necesario realizar una prueba múltiple de medias para conocer donde se obtiene la mejor producción de azúcar.

Tabla XIII. Análisis múltiple de medias LSD Fisher con un α =0.10

Maduración	Medias	n	E.E.	Categorización
Natural	14.65	12	0.24	A
Con Madurante	13.84	12	0.24	B

Fuente: elaboración propia.

La prueba múltiple indica que la mejor producción de azúcar por hectárea se obtiene al no aplicar madurante en combinación a cualquier nivel de consumo de humedad, siendo necesario generar una prueba múltiple de medias para el nivel de humedad presentando en la tabla XIII donde se puede manejar un máximo de consumo de humedad del suelo y no aplicar madurante.

Tabla XIV. Análisis múltiple de medias LSD Fisher con un α =0.10

Maduración	Medias	n	E.E.	Categorización
DPM 60 %	14.52	8	0.33	A
DPM 40 %	14.11	8	0.33	A
DPM 50 %	14.10	8	0.33	A

Fuente: elaboración propia.

3.5. Verificación de supuestos

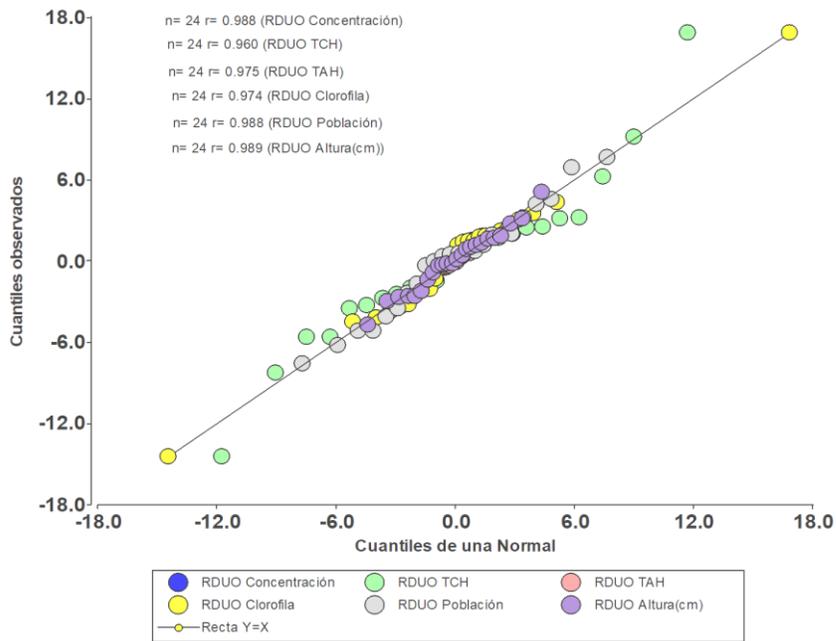
Para que sea válido la significancia determinada por los ANOVA presentados para cada variable; TCH, el contenido de azúcar por hectárea, TAH y también para el rebrote, debiendo cumplir con los supuestos del modelo, que es la verificación de normalidad de las distribuciones e igualdad de varianza. Para el primer supuesto, se empleó la prueba de Shapiro-Wilks, presentando los resultados en la tabla VIII, donde su valor es superior a $p=0.05$, siendo así, que todos los residuos de las variables, cumplen con la distribución normal y esto también se confirma como lo observado en la figura 12 del QQ-plot, ya que existen pocos valores atípicos en los residuos y el resto se ajustan a la línea inclinada, esto se confirma por el valor de r es mayor 0.94, que indica que los datos siguen una distribución normal, por lo tanto, no es necesario transformar las variables.

Tabla XV. Prueba de normalidad Shapiro-Wilks

Residuo	N	Media	D.E.	W*	p (unilateral D)
TCH	24	0.00	6.03	0.97	0.8513
Concentración	24	0.00	1.60	0.95	0.6117
TAH	24	0.00	0.73	0.98	0.9520
Altura(cm)	24	0.00	2.26	0.98	0.9520
Población	24	0.00	3.94	0.95	0.6313
Clorofila	24	0.00	2.63	0.90	0.0730

Fuente: elaboración propia.

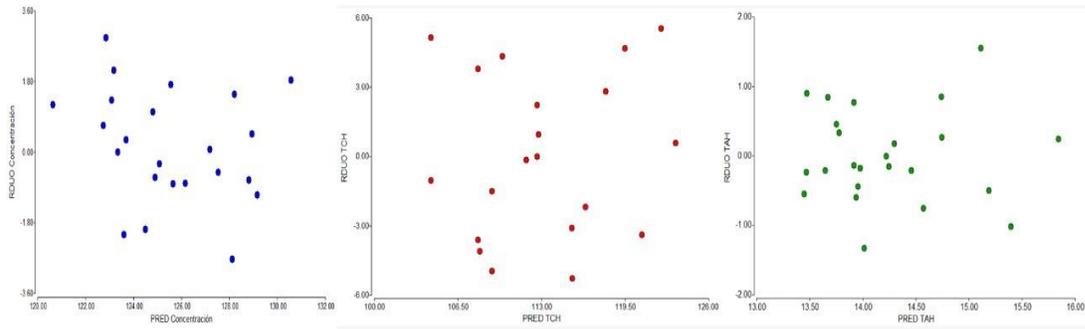
Figura 12. QQ-plot para todas las variables



Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

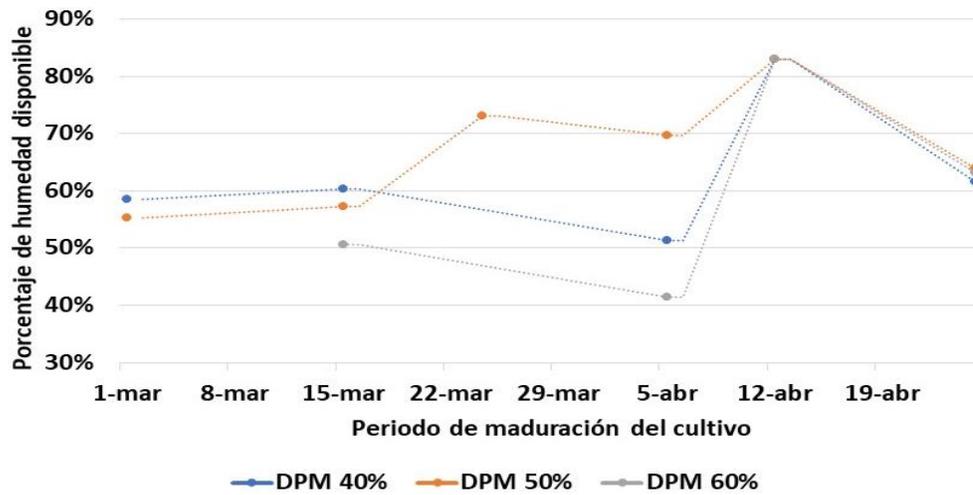
Para el cumplimiento del segundo supuesto que es la homocedasticidad, se realizó un gráfico de dispersión, presentado en la figura 12, donde los predichos para todas las variables se ubican en el eje “Y” y de los residuos en el eje “X”, usando como parámetro de decisión el comportamiento de los registros, por lo tanto, si muestran un comportamiento de embudo son heterogéneas y si es el caso es contrario como lo observado en el gráfico existe homocedasticidad que significa que la varianza se mantiene constante

Figura 13. Homocedasticidad en concentración de azúcar, TCH y TAH



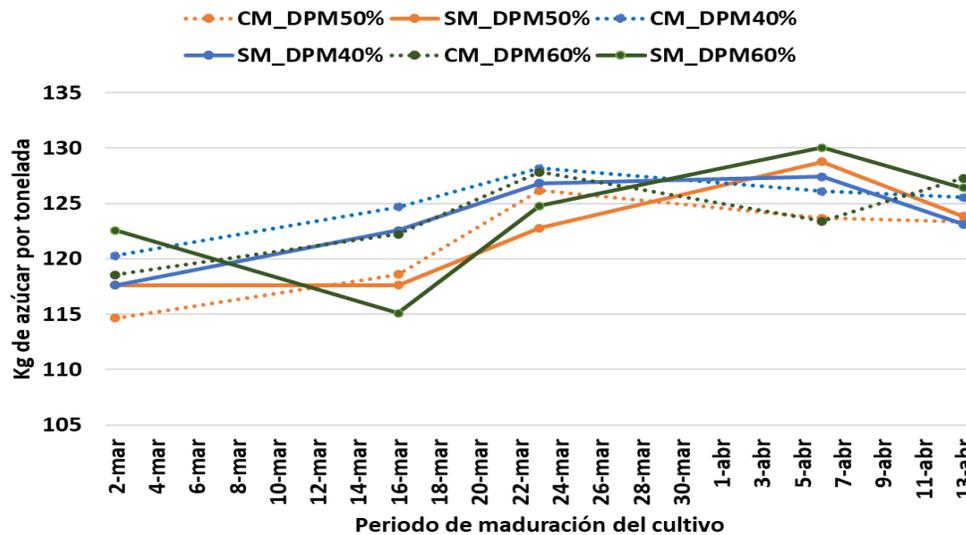
Fuente: elaboración propia, realizado con InfoStat.

Figura 14. Comportamiento del consumo de humedad



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Tendencia del contenido de azúcar por tonelada**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 14, se observa los niveles de humedad manejados durante los 62 días de evaluación, desde la aplicación de madurante hasta la cosecha, esto ayudo a definir los valores de tratamientos de nivel de humedad, siendo 40,50 y 60 por ciento de consumo. Así mismo en la figura 15, se visualiza que las mayores concentraciones de kg de azúcar por tonelada se observan al aplicar madurante independiente de la reducción o consumo de humedad. Obteniéndose el mayor efecto del madurante entre los 30 y 40 días luego de su aplicación.

Objetivo general. Evaluar el nivel de humedad de suelo y tipo de maduración en la variedad CG02-163, a través de un diseño experimental en parcelas dividas, para conocer el efecto sobre la concentración de sacarosa en caña de azúcar, toneladas de caña y rebrote.

Los resultados estadísticos de los objetivos específicos ayudaron a ordenar las respuesta en función al tipo de maduración, toneladas de azúcar por hectárea según el nivel de consumo de humedad que se observa en la tabla XV junto al ingreso marginal, donde los mayores resultados obtenidos fueron al

manejar el nivel de consumo del 60 por ciento lo cual no amerita ningún riego por las condiciones presentes en el desarrollo de la investigación y maduración natural, con solo aplicar madurante existió una reducción del ingreso de 546.92 US\$/ha.

Tabla XVI. Determinación del ingreso neto

Nivel de consumo de humedad	Tipo de maduración	TAH	Costo del riego US\$	Costo de la aplicación de madurante US\$/ha	Costo Total US\$/ha	Ingreso bruto US\$	Ingreso neto en US\$/ha
DPM 60%	Natural	15.23	-	-	-	5,490.56	5,490.56
DPM 50%	Natural	14.57	60.85	-	60.85	5,252.63	5,191.78
DPM 40%	Natural	14.13	58.00	-	58.00	5,094.00	5,036.00
DPM 40%	Con Madurante	14.08	58.00	50	108.00	5,075.98	4,967.98
DPM 60%	Con Madurante	13.81	-	50	50.00	4,978.64	4,928.64
DPM 50%	Con Madurante	13.61	60.85	50	110.85	4,906.54	4,795.69

360.51 US\$ por tonelada de azúcar.

Fuente: elaboración propia.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Análisis interno

4.1. Efecto en la masa de azúcar por tonelada

El uso de productos para acelerar la maduración de la caña es una alternativa para el incremento de sacarosa en los entrenudos del tallo cuando existe un bajo nivel de consumo de la humedad, el producto Moddus 25 EC que fue el aplicado en el experimento actúa como regulador de crecimiento, haciendo que se incremente el azúcar.

En la figura 15 que muestra la tendencia de la acumulación de azúcar por tonelada en el periodo de los 62 días de evaluación bajo el efecto del regulador de crecimiento en la mejora de concentración, el comportamiento observado muestra que efectivamente a los 28 días después de su uso ya presentaba valores de concentración mayores a la maduración sin producto del cultivo posterior a esa fecha disminuye ligeramente y se mantiene constante a la cosecha aún con los aportes de lluvia.

La maduración natural, que también es presentado en la figura 15, se observa un incremento de azúcar de manera gradual, hasta que el día 05 de abril se presenta una lluvia de 20 mm que afecta la reducción o detenimiento del crecimiento por efecto de disminución de humedad y vuelve a reactivarse luego de esa lluvia por lo que reduce la concentración de sacarosa.

Este comportamiento analizado ayuda a comprender las respuestas obtenidas en el análisis de varianza donde se analiza gráficamente (figura 6), siendo los mayores resultados de concentración se alcanza cuando tiene aplicación de madurante en distintos porcentaje de reducción de humedad, esto es confirmado con el análisis de varianza de la tabla VI con un p-valor<0.10, obteniéndose la mejor acumulación cuando se maneja la humedad del suelo hasta un 60 por ciento de consumo, seguido del manejo del 50 y 40 % de consumo, se podría observar que el madurante hace un efecto positivo aun cuando existe un nivel de consumo menor, es decir alta humedad en el suelo, pero la dosis probablemente usada no genera el resultado esperado ya que aún tiene menos concentración de sacarosa respecto a los niveles mayores consumo, donde se encuentra que es la dosis optima, o por lo menos hasta un nivel de 60 por ciento de consumo.

También se observa que puede aumentarse la concentración de manera natural únicamente manejando el porcentaje de reducción de la humedad, según los resultados que entre un mayor nivel de reducción o consumo se aumenta de manera gradual la concentración de sacarosa, siendo así, de igual manera la mayor acumulación de sacarosa se obtuvo al manejar un nivel de consumo o reducción de humedad del 60 %, seguido por el 50 y 40 %, lo que refleja que efectivamente existe una respuesta en el contenido de sacarosa y por lo observado el regulador de crecimiento también puede mejora la concentración.

4.2. Efecto en las toneladas de caña

Al visualizar los valores del peso obtenido de caña de la figura 7, se detecta un efecto en la disminución de toneladas de caña por hectárea al aplicarse madurante, siendo los niveles de humedad más afectados los que se manejan aun mayor nivel de consumo de humedad es decir el 60 y 50 % y el que se riega

constantemente con un menor nivel reducción o consumo se encuentra ligeramente afectado. Caso contrario sucede cuando se maneja un valor de consumo del 60 % y sin aplicación del regulador de crecimiento, generando una estimulación de la producción de biomasa, lo mismo se observa con un valor de 50 % de humedad y por último el nivel de consumo del 40 %.

Es posible que se mejore la producción de biomasa con un mayor nivel de consumo por que existe mayor oxigenación en el suelo en comparación al manejar con un 50 y 40 por ciento de consumo, ya que se riegan con una frecuencia menor.

Según la tabla VIII, existe diferencia significativa con un p-valor < 0.10 , entre la aplicación de madurante y su ausencia, siendo así el análisis de prueba múltiples de medias, muestra un valor medio de 117.77 TCH en comparación al aplicar el regulador con una media de 109.89 TCH, teniendo un diferencial de 7.88 toneladas, esta diferencia surgió porque se amplió a 62 días para la cosecha, siendo el óptimo entre 30-40 días, por lo que causo un deterioro de los tallos que afecta en el peso.

4.3. Efecto en el rebrote a los 32 días después del corte

Al analizar gráficamente las variables mencionas en las figuras 8,9 y 10 para la población, altura y contenido de unidades de clorofila respectivamente, se observa que, para la población, efectivamente el aplicar madurante causa una reducción de la población en comparación al no aplicar madurante siendo el menos afectado el manejo de consumo menor del 40 %, el no aplicar y manejar niveles de consumo mayor favorece el desarrollo del rebrote que se refleja en la población.

Siguiendo el análisis se observa que para la variable altura, es mayor cuando se manejó el riego con niveles menores del 50 % de humedad y con aplicación de madurante, esto es lo esperado ya que existe menor población por lo que se estimula más el crecimiento, el desarrollo de altura es contrario a la población, a mayor población menor altura, siendo así, los tratamientos de mayor nivel de humedad de consumo y maduración natural son ligeramente afectados en el crecimiento por la población generada en el rebrote. El tratamiento más afectado fue al que se le aplicó madurante y con mayor nivel de humedad de consumo donde se observa menor población y altura.

Para el caso de las mediciones de clorofila, esta interrelacionada con la población y altura de planta, por tanto, en la maduración natural el tratamiento que desarrollo más población fue el de mayor consumo de humedad, y el desarrollo de altura igual a demás tratamientos esto conlleva en una reducción de clorofila porque existe más individuos y desarrollo que necesita de nutrientes principalmente nitrógeno, para el caso del mayor consumo de humedad y aplicación de madurante se observó que desarrollo en población es intermedio a los demás y la tasa de crecimiento es menor por lo que existe menos demanda de nitrógeno, presentando el contenido de clorofila ligeramente superior, pero, el tratamiento con mejor contenido de clorofila con y sin madurante fue el tratamiento de manejo del riego con un consumo menor del 50 por ciento, lo que ayudo para mantenerse en condiciones óptimas sin requerimientos de nitrógeno fue el mediano desarrollo de población.

Teniendo los resultados las tablas IX, X y XI para variables con un nivel de significancia el p -valor < 0.10 , no existe diferencias significativas entre el nivel de reducción de humedad y maduración, únicamente las diferencias observadas fueron las gráficas, que muestra un potencial al manejar el riego con un nivel de reducción menor al 60 % y con maduración natural, y surgiendo la necesidad de

aplicación suplementaria de nitrógeno, el efecto de madurante es más evidente cuando se maneja un nivel de consumo mayor en el rebrote inhibiendo la brotación en la cantidad de tallos y altura.

4.4. Toneladas de azúcar

La primera impresión observada constituye el aumento de kilogramos de azúcar al aplicar el regulador de crecimiento, siendo los mayores incrementos al aumentar el consumo en la humedad contenida, pero esto, se comporta inversamente, porque causa un deterioro en el peso de los tallos reduciendo el peso por hectárea al cosecharse a los 62 días luego de aplicar el regulador. Caso contrario sucede con la madurez natural al incrementar el nivel de consumo de humedad aumenta la concentración y consigo el TCH, siendo así, la mejor opción es la maduración natural con la reducción o consumo al 60 %.

Al realizar el análisis de varianza y teniendo como resultado la tabla XII se observa un efecto en la aplicación de madurante, con un p-valor < 0.10 , donde existe diferencia significativa, que indican a través de la prueba múltiples de medias que los mayores incrementos fue el manejo de la maduración natural donde la media observada fue de 14.65 TAH y con la aplicación del producto de 13.84 TAH, obteniendo un diferencial de 0.81 toneladas, lo último a considerar el costo en la aplicación y así mismo el manejo del riego según el contenido de humedad permitido a consumirse.

- **Análisis externo**

La aplicación de diseños experimentos especialmente en la agricultura Guatemalteca es ampliamente usada para evaluar el efecto de distintos tratamientos, donde Espinoza *et al.*, (2020) realiza evaluaciones de productos como madurantes usando bloques al azar, de la misma manera Morales *et al.*,

(2015) usó para la prueba de productos químicos y dosis en distintos materiales vegetativos de caña en franjas divididas, más lo aplicado por Castro *et al.*, (2009) para la validación de programas de riego en la maduración, siendo así la oportuna aplicación de parcelas divididas para la evaluación.

Definitivamente el contenido de sacarosa en los entrenudos de la caña se fue incrementando de forma gradual al pasar a la etapa de maduración, referente a lo mencionado. Esto, a la vez, conlleva a la reducción gradiente de crecimiento porque se dedica a la acumulación de sacarosa.

Según estudios realizados la ventana de cosecha donde existe el mayor incremento del almacenamiento de sacarosa surge en un intervalo de 28 a 56 días posteriores a la aplicación, de igual manera, ocurre la maduración natural, pero siendo menor, como se ha observado en los diferentes materiales vegetativos evaluados. (Espinoza, 2012) Siendo así, que para el producto evaluado como madurante las mayores concentraciones se observaron entre los 30 y 40 días posteriores a la aplicación y en la maduración natural se igualaron las concentraciones aproximadamente una semana después, aunque siguió mejorando su concentración hasta que fue interrumpida por aporte de lluvia.

La consecuencia de la evaluación permitió visualizar el incrementó de forma natural al disminuir el nivel de humedad, dejando que la planta consuma un alto nivel de humedad, al no existir restricción de agua en el suelo la caña continua su crecimiento y esto conlleva a disminuir la calidad de sus jugos siendo así, la disminución de sacarosa, estos coincide con lo mencionado por Méndez, *et al.*, (2016), que para mejorar la acumulación de sacarosa era necesario que la planta se someta a un estrés hídrico antes del corte o por lo menos manejar consumos altos de humedad.

El nivel de humedad relativamente alto hace que la planta ejerza menor fuerza para ascender el agua a la caña, por lo que ayudaría en el incremento de biomasa, lo que muy bien se conoce que el mayor nivel de déficit o reducción de agua en el cultivo es del 60 %. (Castro, 2012) Por lo que aún no se esperaría una disminución en las toneladas de caña, ya que si hubiera superado el 60 % la planta gastaría más energía en superar la fuerza de adhesión de las moléculas de agua en el suelo, en dado caso fisiológicamente la caña se autorregularía al disminuir la abertura estomática, interpretándose, la disminución el consumo de agua por las cañas, que conlleva a la reducción del delta de crecimiento y consigo la producción.

Esto se contrasta a los experimentos realizados donde se manejaron distintos programas de riego, al igual encontraron incrementos de producción al no someter el cultivo a déficit, resultados obtenidos por Castro, *et al.*, (2009). Es decir, el estrés ocasionado a la planta se presentará al aumentar el nivel de consumo mayor al 60 por ciento, y también es referente a lo mencionado Araújo *et al.*, (2016), al acumular 38 mm de déficit las TCH empiezan a disminuir.

La respuesta del regulador de crecimiento posterior a la cosecha se muestra en las variables de desarrollo del cultivo, siendo así, una sobredosificación del producto conlleva a la reducción del delta de crecimiento o población del cultivo. (Espinoza, 2012) No existió ninguna sobredosificación porque las mediciones de las variables en el rebrote no presentaron ninguna diferencia estadística.

En tanto las TCH resumen la respuesta del producto químico, siendo el resultado de multiplicar el almacenamiento de sacarosa en el entrenudo del tallo por tonelada por el total de toneladas, por tanto, incluye ambas variables que definen la producción, en este sentido la mayor o mejor respuesta se genera a

un déficit del 60 por ciento y maduración natural, el efecto del madurante puede reducirse por la cosecha a los 62 días posteriores a la aplicación, valor no incluido en el rango óptimo que se observó.

CONCLUSIONES

1. Se estableció mediante el ANOVA, con una confiabilidad del 90 %, que existe efecto significativo en la concentración de kilogramos de azúcar por tonelada, por efecto del madurante, por tanto, el aplicar madurante incrementa, principalmente cuando se maneja un nivel de consumo de humedad del 60 por ciento.
2. Se observa que existe diferencia en las toneladas de caña por hectárea según el tipo de maduración con el 10 % de significancia, los resultados mostraron un valor medio de 117.77 TCH para maduración natural y de 109.89TCH al aplicar madurante, teniendo un diferencial de 7.88 toneladas. Dicha diferencia puede ser causada por el aumento del tiempo de la cosecha a 62 días posteriores a la aplicación, en contraste a lo recomendado de 30-40 días, produciendo un deterioro de la caña y afectando el peso.
3. Según el análisis de varianza con significancia del 10 %, no existe efecto significativo del nivel de humedad y la maduración sobre las variables del rebrote; población, altura y contenido de clorofila, únicamente las diferencias observadas fueron gráficas, que muestra un potencial al manejar el riego con un porcentaje de consumo menor al 60 por ciento y con maduración natural.
4. El efecto de la aplicación del tipo de maduración en las toneladas de azúcar por hectárea con una significancia del 10 %, indica que los mayores incrementos se manifestaron con el manejo de la maduración de forma natural, donde la media observada es de 14.65 TAH y de 13.84 TAH con

madurante, obteniendo un diferencial de 0.81 toneladas. Por tanto, el mejor tratamiento se refiere al manejo de la humedad con nivel de consumo del 60 % y maduración natural, la cual maximiza la producción de TAH, con este manejo existe una disminución de costo de US\$561.92/ha sin aplicar madurante respecto al aplicar bajo el nivel de humedad de consumo del 60 %.

RECOMENDACIONES

1. Cosechar en un periodo entre los 30 a 40 días posteriores a la aplicación del madurante, para aprovechar el incremento de concentración de sacarosa, pudiéndose mejorar al manejar los porcentajes de consumo de humedad.
2. Realizar mediciones de peso de tallos luego de la aplicación del producto químico como madurante para los próximos estudios, con el objetivo de conocer el deterioro causado por el producto ya que afecta las TCH obtenidas en la cosecha.
3. Aprovechar la respuesta en la población y altura de tallos en el rebrote, al considerar la aplicación de nitrógeno suplementario, para disminuir la deficiencia de nitrógeno conocida de forma indirecta por las lecturas de clorofila.
4. Generar balance hídrico acompañado de lecturas de humedad gravimétrica del suelo, para pronosticar las condiciones de humedad de suelo para aplicar el tratamiento que genere una mayor respuesta de TCH.
5. Realizar más experimentos de la misma naturaleza en distintas texturas de suelos, mes de corte y variedades mediante diseños experimentales para encontrar la mejor combinación de humedad de suelo y maduración favorable y no generalizar los resultados en relación con un experimento debido a la heterogeneidad de condiciones en los campos donde se cultiva.

REFERENCIAS

1. Agencia Espacial Mexicana, (2017). *Introducción al procesamiento de imágenes satelitales con software libre, modulo 3*, México: Autor. Recuperado de <https://docplayer.es/62772024-Introduccion-al-procesamiento-de-imagenes-satelitales-con-software-libre-modulo-03.html>
2. Aguilar, N.; Galindo, G.; Fortanelli, J.; Contreras, C. (marzo 2010) Índice normalizado de vegetación en caña de azúcar en la Huasteca Potosina. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 14 (2) pp. 49-65.
3. Ariza, A., Roa, O. J. y Serrato, P. K. y León Rincón, H. A. (agosto 2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), 105-122. doi: 10.19053/01233769.5863.
4. Castillo, R., Silva, E., (2004). Fisiología, floración y mejoramiento genético de la caña de azúcar en Ecuador. Ecuador: Caracola Editores.
5. Castro, O. (2012). *Riego y Meteorología en Caña de Azúcar. El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala*. Guatemala. MAGA.
6. Castro, O., Ramirez, C., Martinez, A., Tanchez, M. y Celada, C. (2009). *Validación de programas de riego pre-corte en diferentes*

condiciones de suelo en la zona cañera de Guatemala. Memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2008-09. Guatemala: CENGICAÑA.

7. Dagnino, J. (enero 2014). Comparaciones múltiples. *Revista Chilena de Anestesia*, 43(1), 311-312.
8. Espinoza, G. (2012). Maduración de la Caña de Azúcar. *El Cultivo de la Caña de Azúcar en Guatemala*, 260. Guatemala: CENGICAÑA.
9. Inman-Bamber, NG y De Jager, JM (junio 1988). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y la calidad del tallo de la caña de azúcar. *Asociación Sudafricana de Tecnólogos del Azúcar* (62), pp. 140-144.
10. Lahura, E. (2003). *El coeficiente de correlación y correlaciones espurias*. México: Departamento Académico de Economía.
11. León R. y Villatoro, B. (2017). *Análisis exploratorio de la dependencia entre los índices de vegetación NDWI y MSI obtenidos de imágenes de satélite landsat 8, la humedad de la caña de azúcar y la humedad del suelo. Memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2016-17*. Guatemala: CENGICAÑA.
12. López Bautista, E. A., y Quaresma, E. (2012). *Análisis de medidas repetidas provenientes de un experimento sobre riego y madurante en caña de azúcar*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

13. López, E. (2008). *Diseños y análisis de experimentos*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
14. Martínez, P., y Cristian, H. (2008). *Evaluación de cuatro tiempos de suspensión del riego previo a la cosecha de la caña de azúcar, variedad CB 3822, en el Ingenio Tres Valles, Cantarranas, Honduras: Ingenio Tres Valles*.
15. Méndez Adorno, J. M., y Salgado-García, L. (2012). Suspensión del riego en caña de azúcar durante la maduración: efecto en el rendimiento y calidad del jugo. México. COLPOS.
16. Méndez-Adorno, J. M., Salgado-García, S., Lagunes-Espinoza, L. C., Mendoza-Hernández, J. R. H., Castelán-Estrada, M., Córdova-Sánchez, S., y Hidalgo-Moreno, C. I. (septiembre 2016). Relación entre parámetros fisiológicos en caña de azúcar (*Saccharum spp.*) bajo suspensión de riego previo a la cosecha. *AGROProductividad*, 9(3), 15-21.
17. Morales, J., Espinoza, G., López, K., Ramos, F., Cruz, W., Tuchan, L. (2015). Respuesta de variedades tardías a la maduración química. Memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2014-15. Guatemala: CENGICAÑA.
18. Pereira, LF, Ferreira, VM, Oliveira, NG, Sarmiento, PL, Endres, L. y Teodoro, I. (febrero 2017). Niveles de azúcares de cuatro genotipos de caña de azúcar en diferentes partes del tallo durante la fase de maduración. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 89 (2), 1231-1242.

19. Pulido, H. G., de la Vara Salazar, R., González, P. G., Martínez, C. T., y Pérez, M. D. C. T. (2012). Análisis y diseño de experimentos. New York, NY, USA: McGraw-Hill.

20. Salvador, M. y Lagos, M. (2010). *Estimación de vegetación, humedad superficial y cuerpos de agua utilizando percepción remota: Salar Brinkerhoff, desierto de Atacama, Chile*. Chile: Ediciones SM.