

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

CENTRO DE POSTGRADOS



MAESTRÍA EN AGROINDUSTRIA

MENCIÓN SISTEMAS AGROINDUSTRIALES

**PROYECTO DE INNOVACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN AGROINDUSTRIA MENCIÓN SISTEMAS
AGROINDUSTRIALES**

**OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE MIEL DE CAÑA DE
AZÚCAR**

AUTORA:

SHIRLEY ISAMAR POMAVILLA GUAMINGA

DIRECTOR DEL PROYECTO:

DR. C. AMAURY PÉREZ MARTÍNEZ, PhD

CODIRECTORA DEL PROYECTO

DRA. C. ESTELA GUARDADO YORDI, PhD

PASTAZA-ECUADOR

2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Shirley Isamar Pomavilla Guaminga con C.I. 2200410633, como autora del Proyecto de Innovación titulado: **Optimización del proceso de obtención de miel de caña de azúcar**, el cual constituye una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del Director de dicho trabajo Dr. Amaury Pérez Martínez y Codirectora Dra. Estela Guardado Yordi en tal sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo como interpretación de datos y elaboración de conclusiones dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

En el cantón Pastaza a los 22 días del mes de septiembre del 2020.



Ing. Pomavilla Guaminga Shirley Isamar

C.I. 2200410633

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de innovación y desarrollo aprueba el proyecto de Innovación titulado: **“Optimización del proceso de obtención de miel de caña de azúcar”**.



Firmado electrónicamente por:
**MONICA PAULINA
ECHEVERRIA
GUEVARA**

Dra. C. Mónica Paulina Echeverría Guevara, PhD

PRESIDENTE DE TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**REINIER
ABREU**

Dr. C. Reinier Abreu Naranjo, PhD

MIEMBRO DE TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**MANUEL LAZARO
PEREZ QUINTANA**

Dr. C. Manuel Lázaro Pérez Quintana, PhD

MIEMBRO DE TRIBUNAL



Firmado electrónicamente por:
**VICENTE FABRICIO
DOMINGUEZ NARVAEZ**

Ing. Vicente Fabricio Domínguez Narváez, MsC.

MIEMBRO DE TRIBUNAL SUPLENTE



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

Oficio No. 261-SAU-UEA-2020

Puyo, 14 de septiembre de 2020

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El Proyecto de Investigación correspondiente a la Ingeniera POMAVILLA GUAMINGA SHIRLEY ISAMAR con C.I. 2200410633, con el Tema: “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE MIEL DE CAÑA DE AZÚCAR AUTORA”, de la Maestría en Agroindustria. Director del proyecto Dr. Pérez Martínez Amaury, PhP., ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 2%, Informe generado con fecha 14 de septiembre de 2020 por parte del director conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,

Ing. Italo Marcelo Lara Pilco M.Sc.

ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

www.uea.edu.ec

Campus UEA, Paso Lateral Km. 2 ½ Vía Napo
Puyo, Pastaza - Ecuador

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi pilar, por brindarme sabiduría, entendimiento y permitir cumplir una meta más en mi vida profesional.

A mi madre por ser la luz que ilumina mis días, por brindarme amor, confianza y apoyo incondicional en cada meta planteada.

A mi abuelito, hermanas y hermano por su aprecio, preocupación e inculcar ese ánimo de lucha y superación.

A mi esposo por brindarme paciencia, amor, apoyo y motivación para ser cada día mejor persona y profesional.

A mis amados sobrinos y sobrinas quienes son la inspiración para seguir adelante ante cualquier obstáculo.

A toda mi familia por su apoyo y confianza.

A los docentes que impartieron de una manera muy objetiva sus conocimientos y experiencias durante el período de estudio e inculcar la pasión sobre la investigación y aprendizaje continuo.

Al Director y Codirectora que supieron llegar a mí de la mejor manera con sus conocimientos, experiencias, apoyo, dedicación y siempre estar pendientes en mi crecimiento profesional y personal.

A mis amigos, amigas, compañeras y compañeras por ese apoyo, cariño y experiencias compartidas.

Shirley Pomavilla Guaminga

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, por llenarme de bendiciones y pruebas que fortalecen mi espíritu, fé y corazón. Por darme la familia tan maravillosa y rodearme de personas especiales.

A mi madre Lola Guaminga, por su infinito amor y no perder la lucha ante nada, por ser esa fuerza y esa voz que siempre dice adelante, yo estaré ahí!

A mi abuelito Agustín Guaminga, hermanas Vanessa y Josselin y hermano Geovanny por su apoyo y cariño incondicional.

A mi esposo Cesar Andino por su amor, paciencia, apoyo y fortaleza en todo momento.

A mis amados sobrinos Erick, Keyler, Wesly y Deyner por su ternura que inspiran amor.

A mis familiares por su infinito amor y confianza.

A los docentes por su entusiasmo y carisma e inculcar conocimientos.

Al Director Dr. Amaury Pérez y Codirectora Dra. Estela Guardado por su constante apoyo y comprensión e impartir sus conocimientos y siempre estar en todos los momentos.

A mis, amigos, amigas, compañeras y compañeras por su confianza.

Shirley Pomavilla Guaminga

RESUMEN EJECUTIVO

Los procesos de elaboración empíricos causan constantes variaciones en los atributos de calidad de miel de la caña de azúcar que afectan a la viscosidad, sabor y presencia de cristales) y genera pérdidas en los productores. El objetivo fue optimizar el proceso de obtención de la miel de caña de azúcar utilizando una modelación matemática para mejorar los atributos de calidad del producto final, se utilizó la metodología de simulación de procesos que involucra tres etapas para su aplicación (modelación, simulación y optimización), permitió el planteamiento de los modelos matemáticos de calidad y económico. Se utilizó el simulador *Octave* para la aplicación de los modelos matemáticos en los escenarios aleatorios definidos desde el punto de vista bibliográfico. En las tres estrategias de optimización de la simulación, en la primera estrategia se logró la reducción de la incertidumbre de rangos de los parámetros operacionales en el primer estudio de caso, los rangos óptimos fueron (74,56 - 74,79) °Brix y (3,76 - 3,80) pH, en la segunda estrategia de optimización del VAN en el primer estudio de caso, los valores fueron (75,68) °Brix y (4,10) pH, en la tercera estrategia de optimización de la calidad en el primer estudio de caso, los valores fueron (75,61) °Brix y (4,11) pH. Los valores de los parámetros operacionales para las tres estrategias de optimización permitieron obtener los valores óptimos de (75,68) °Brix y (4,10) pH que maximizan los indicadores económicos como los de calidad.

Palabras claves: Diseño de procesos, atributos de calidad, miel de caña de azúcar, optimización.

ABSTRACT

The empirical production processes cause constant variations in the quality attributes of sugar cane honey that affect the viscosity, flavor and presence of crystals) and generate losses in the producers. The objective was to optimize the process of obtaining sugarcane honey using mathematical modeling to improve the quality attributes of the final product, the process simulation methodology was used that involves three stages for its application (modeling, simulation and optimization), allowed the establishment of quality and economic mathematical models. The Octave simulator was used for the application of the mathematical models in the randomized scenarios defined from the bibliographic point of view. In the three optimization strategies of the simulation, in the first strategy the reduction of the uncertainty of ranges of the operational parameters was achieved in the first case study, the optimal ranges were (74.56 - 74.79) °Brix and (3.76 - 3.80) pH, in the second NPV optimization strategy in the first case study, the values were (75.68) °Brix and (4.10) pH, in the third optimization strategy of the quality in the first case study, the values were (75.61) °Brix and (4.11) pH. The values of the operational parameters for the three optimization strategies allowed obtaining the optimal values of (75.68) °Brix and (4.10) pH that maximize economic indicators such as quality.

Keywords: *process design*, quality attributes, sugar cane honey, optimization.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMA CIENTÍFICO	2
1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO II. REVISIÓN BILIOGRÁFICA.....	4
2. FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL Y TEÓRICA.....	4
2.1. PRODUCCIÓN DE MIEL DE CAÑA DE AZÚCAR	5
2.1.1. Materia prima.....	5
2.1.2. Parámetros de operación del proceso producción de la miel de caña	6
2.1.3. Atributos de calidad de la miel.....	7
2.2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PROCESOS TECNOLÓGICOS	8
2.2.1. Tipos de modelos matemáticos.....	8
2.3. SIMULACIÓN DE PROCESOS	11
2.3.1. Simuladores de procesos.....	12
2.3.2. Asistentes matemáticos utilizados en la simulación de procesos.....	13
2.3.3. Metodologías para la simulación de procesos.....	14
2.4. OPTIMIZACIÓN.....	15
2.4.1. Métodos de optimización	15
2.4.2. Metodologías para la optimización.....	17
2.5. INCERTIDUMBRE.....	18
2.5.1. Distribución de probabilidad	19
2.6. DISEÑO DE PROCESO Y CALIDAD.....	20
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	22
3.1. LOCALIZACIÓN.....	22
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	22
3.2.1. Investigación descriptiva	22
3.2.2. Investigación predictiva	22
3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	23
3.3.1 Método de modelación.....	23
3.4. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DEL PROCESO	23
3.4.1. Etapa de modelación	23
3.4.2. Simulación.....	25
3.4.3. Optimización	25
3.4.4. Análisis de la incertidumbre	26
3.5. ESTRATEGIAS PARA LA BÚSQUDA DE LAS MEJORES CONDICIONES ÓPTIMAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MIEL DE CAÑA DE AZÚCAR.....	28
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
4. RESULTADOS.....	29
4.1. MODELOS MATEMÁTICOS DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE MIEL.....	29
4.1.1. Identificación de los fenómenos que se desarrollan en el proceso de obtención de miel	29

4.1.2. Desarrollo de modelos.....	30
4.2. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MIEL DE CAÑA	35
4.2.1. Primer estudio de caso	35
4.2.2. Segundo estudio de caso	38
4.2.3. Tercer estudio de caso	41
4.3. SELECCIÓN DE LAS MEJORES SIMULACIONES DE LOS TRES ESTUDIOS DE CASO, SE APLICÓ LAS SIGUIENTES ESTRATEGIAS:	44
CONCLUSIONES.....	45
RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de la materia prima y operacionales del proceso para cada estudio de caso	26
Tabla 2. Modelos matemáticos de balance masa y energía y dimensionamiento de los equipos para cada una de las operaciones de obtención de miel de caña.	30
Tabla 3. Modelos matemáticos en el cálculo de indicadores ambientales	32
Tabla 4. Modelos matemáticos para los atributos de calidad de la miel	33
Tabla 5. Modelos matemáticos para el cálculo del nivel sigma y los DPMO	33
Tabla 6. Modelos matemáticos y restricciones para optimizar: rango, calidad y VAN en todos los casos de estudio.....	34
Tabla 7. Selección de las mejores simulaciones del primer estudio de caso	38
Tabla 8. Selección de las mejores simulaciones del segundo estudio de caso	40
Tabla 9. Selección de las mejores simulaciones del tercer estudio de caso	43
Tabla 10. Selección de las mejores simulaciones de los tres estudio de caso	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasos para la simulación matemática.	23
Figura 2. Estrategias para la búsqueda de la mejor condición óptima del proceso de producción de miel.	28
Figura 3. Tecnología del proceso de obtención de miel.....	29
Figura 4. Comportamiento del VAN en las tres producciones para el primer estudio de caso....	37
Figura 5. Comportamiento del VAN en las tres producciones para el segundo estudio de caso.	40
Figura 6. Comportamiento del VAN en las tres producciones para el tercer estudio de caso.	42

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Modelos matemáticos desarrollados y utilizados en la simulación en el análisis económico	52
Anexo 2. Comportamiento de los atributos de calidad en las tres producciones para el primer estudio de caso. (a, b, c) viscosidad, (d, e, f) presencia de cristales y (g, h, i) sabor	57
Anexo 3. Comportamiento del DPMO (unidades) (a, b, c) y nivel sigma (d, e, f) en las tres producciones para el primer estudio de caso	58
Anexo 4. Comportamiento del área de transferencia de calor en el evaporador 3 en las tres producciones para el primer estudio de caso	58
Anexo 5. Comportamiento de los atributos de calidad en las tres producciones para el segundo estudio de caso. (a, b, c) viscosidad, (d, e, f) presencia de cristales y (g, h, i) sabor	59
Anexo 6. Comportamiento del DPMO (unidades) (a, b, c) y nivel sigma (d, e, f) en las tres producciones para el segundo estudio de caso.....	60
Anexo 7. Comportamiento del área de transferencia de calor en el evaporador 3 en las tres producciones para el segundo estudio de caso.....	60
Anexo 8. Comportamiento de los atributos de calidad en las tres producciones para el tercer estudio de caso. (a, b, c) viscosidad, (d, e, f) presencia de cristales y (g, h, i) sabor	61
Anexo 9. Comportamiento del DPMO (unidades) (a, b, c) y nivel sigma (d, e, f) en las tres producciones para el tercer estudio de caso.....	62
Anexo 10. Comportamiento del área de transferencia de calor en el evaporador 3 en las tres producciones para el tercer estudio de caso.....	62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	30
Ecuación 2.....	30
Ecuación 3.....	30
Ecuación 4.....	30
Ecuación 5.....	30
Ecuación 6.....	30
Ecuación 7.....	30
Ecuación 8.....	30
Ecuación 9.....	30
Ecuación 10.....	30
Ecuación 11.....	31
Ecuación 12.....	31
Ecuación 13.....	31
Ecuación 14.....	31
Ecuación 15.....	31
Ecuación 16.....	31
Ecuación 17.....	31
Ecuación 18.....	31
Ecuación 19.....	31
Ecuación 20.....	31
Ecuación 21.....	31
Ecuación 22.....	31
Ecuación 23.....	31
Ecuación 24.....	31
Ecuación 25.....	32
Ecuación 26.....	32
Ecuación 27.....	32
Ecuación 28.....	32
Ecuación 29.....	32
Ecuación 30.....	32
Ecuación 31.....	32
Ecuación 32.....	32
Ecuación 33.....	32

Ecuación 34.....	32
Ecuación 35.....	32
Ecuación 36.....	33
Ecuación 37.....	33
Ecuación 38.....	33
Ecuación 39.....	33
Ecuación 40.....	33
Ecuación 41.....	33
Ecuación 42.....	34
Ecuación 43.....	34
Ecuación 44.....	34
Ecuación 45.....	34
Ecuación 46.....	34
Ecuación 47.....	34
Ecuación 48.....	34
Ecuación 49.....	34
Ecuación 50.....	34
Ecuación 51.....	34
Ecuación 52.....	34
Ecuación 53.....	34
Ecuación 54.....	34
Ecuación 55.....	34
Ecuación 56.....	52
Ecuación 57.....	52
Ecuación 58.....	52
Ecuación 59.....	52
Ecuación 60.....	52
Ecuación 61.....	52
Ecuación 62.....	52
Ecuación 63.....	52
Ecuación 64.....	52
Ecuación 65.....	52
Ecuación 66.....	53
Ecuación 67.....	53
Ecuación 68.....	53

Ecuación 69.....	53
Ecuación 70.....	53
Ecuación 71.....	53
Ecuación 72.....	53
Ecuación 73.....	53
Ecuación 74.....	53
Ecuación 75.....	53
Ecuación 76.....	53
Ecuación 77.....	54
Ecuación 78.....	54
Ecuación 79.....	54
Ecuación 80.....	54
Ecuación 81.....	54
Ecuación 82.....	54
Ecuación 83.....	54
Ecuación 84.....	54
Ecuación 85.....	54
Ecuación 86.....	54
Ecuación 87.....	54
Ecuación 88.....	54
Ecuación 89.....	54
Ecuación 90.....	54
Ecuación 91.....	54
Ecuación 92.....	54
Ecuación 93.....	55
Ecuación 94.....	55
Ecuación 95.....	55
Ecuación 96.....	55
Ecuación 97.....	55
Ecuación 98.....	55
Ecuación 99.....	55
Ecuación 100.....	55
Ecuación 101.....	55
Ecuación 102.....	55
Ecuación 103.....	55

Ecuación 104.....	55
Ecuación 105.....	55
Ecuación 106.....	55
Ecuación 107.....	55
Ecuación 108.....	55
Ecuación 109.....	55
Ecuación 110.....	55
Ecuación 111.....	55
Ecuación 112.....	55
Ecuación 113.....	55
Ecuación 114.....	55
Ecuación 115.....	55
Ecuación 116.....	56
Ecuación 117.....	56
Ecuación 118.....	56
Ecuación 119.....	56
Ecuación 120.....	56
Ecuación 121.....	56
Ecuación 122.....	56
Ecuación 123.....	56
Ecuación 124.....	56
Ecuación 125.....	56
Ecuación 126.....	56
Ecuación 127.....	56
Ecuación 128.....	56
Ecuación 129.....	56
Ecuación 130.....	56
Ecuación 131.....	56
Ecuación 132.....	56
Ecuación 133.....	56
Ecuación 134.....	56
Ecuación 135.....	56
Ecuación 136.....	56
Ecuación 137.....	56
Ecuación 138.....	56

Ecuación 139.....	57
-------------------	----

NOMENCLATURA

ABREVIATURAS	SIGNIFICADO	UNIDADES
FCE	Flujo de caña que entra	kg
Ef	Eficiencia	%
Bag	Bagazo	kg
Bagc	Bagacillo	kg
JCSMol	Jugo de caña que sale de la molienda	kg
JCSFiltr	Jugo de caña que sale del filtrado	kg
JCSCalent	Jugo de caña que sale del calentamiento	kg
TempJCSFiltr	Temperatura de jugo de caña que sale del filtrado	°C
TempJCSCalent	Temperatura de jugo de caña que sale del calentamiento	°C
BrixJCSFiltr	°Brix jugo de caña que sale del filtrado	°Brix
CPJCCalent	Calor específico del jugo de caña del calentamiento	kJ/kg*K
TSupCalent	Temperatura de superficie del calentamiento	°C
FlujJCCalent	Flujo de jugo de caña del calentamiento	kg/s
AreaCalent	Área de calentamiento	m ²
TiempCalent	Tiempo de calentamiento	S
QgCalent	Calor ganado calentamiento	J/s
PerdTCCalent	Perdida de transferencia de calor en calentamiento	%
QcedCalent	Calor cedido calentamiento	J/s
deltaTCalent	Variación de temperatura de calentamiento	°C
CoefGlobalTCCalent	Coeficiente global de transferencia de calor en calentamiento	W/m ² k
VapSEvap1	Vapor que sale de la evaporación 1	kg/s
JCSEvap1	Jugo de caña que sale del calentamiento	kg
CpJCEvap1	Calor específico del jugo de caña en el evaporador 1	kJ/kg*K

BrixJCSCalent	°Brix jugo de caña que sale del calentamiento	°Brix
BrixJCSEvap1	°Brix jugo de caña que sale de la evaporación 1	°Brix
TempJCSEvap1	Temperatura jugo de caña que sale de la evaporación 1	°C
MSNM	Metros sobre el nivel del mar	m
P	Presión	Pa
TSat	Temperatura de saturación	°C
IncTEbEvap1	Incremento de temperatura de ebullición evaporación 1	°C
TpromEvap1	Temperatura promedio evaporación 1	°C
TsupEvap1	Temperatura de superficie de la evaporación 1	°C
CpJCSCalent	Calor específico del jugo de caña que sale del calentamiento	kJ/kg*K
TEbEvap1	Temperatura de ebullición de la evaporación 1	°C
CLEvap1	Calor latente evaporación 1	kJ/kg
VPrEVAP1	Vapor producido en la evaporación 1	kg
FlujVPrEvap1	Flujo del vapor producido en la evaporación 1	kg/s
TiempEvap1	Tiempo de la evaporación 1	S
CpV	Calor específico del vapor	kJ/kg*K
FlujJCEvap1	Flujo de jugo de caña de la evaporación 1	kg/s
PerdTCEvap1	Pérdida de transferencia de calor en la evaporación 1	%
QcedEvap1	Calor cedido en la evaporación 1	J/s
QgEvap1	Calor ganado en la evaporación 1	J/s
deltaTEvap1	Variación de temperatura de la evaporación 1	°C
CoefGlobalTCEvap1	Coefficiente global de transferencia de calor evaporación 1	W/m ² k
QInterEvap1	Calor intercambiado en la evaporación 1	J/s
AreaEvap1	Área evaporación 1	m ²

VapSEvap2	Vapor que sale de la evaporación 2	kg/s
JCSEvap2	Jugo de caña que sale de la evaporación 2	kg
BrixJCSEvap2	°Brix jugo de caña que sale de la evaporación 2	°Brix
TempJCSEvap2	Temperatura jugo de caña que sale de la evaporación 2	°C
IncTEbEvap2	Incremento de temperatura de ebullición evaporación 2	°C
TpromEvap2	Temperatura promedio evaporación 2	°C
TSupEvap2	Temperatura de superficie de la evaporación 2	°C
CpJCSEvap1	Calor específico del jugo de caña que sale de la evaporación 1	kJ/kg*K
TEbEvap2	Temperatura de ebullición de la evaporación 2	°C
CLEvap2	Calor latente de la evaporación 2	kJ/kg
VPrEvap2	Vapor producido en la evaporación 2	kg
FlujVPrEvap2	Flujo del vapor producido en la evaporación 2	kg/s
TiempEvap2	Tiempo de la evaporación 2	S
AreaEvap2	Área evaporación 2	m ²
FlujJCEvap2	Flujo de jugo de caña de la evaporación 2	kg/s
PerdTCEvap2	Pérdida de transferencia de calor en la evaporación 2	%
QcedEvap2	Calor cedido en la evaporación 2	J/s
QgEvap2	Calor ganado en la evaporación 2	J/s
DeltaTEvap2	Variación de temperatura de la evaporación 2	°C
CoefGlobalTCEvap2	Coeficiente global de transferencia de calor en la evaporación 2	W/m ² k
QInterEvap2	Calor intercambiado en la evaporación 2	J/s
VapSEvap3	Vapor que sale de la evaporación 3	kg/s
JCSEvap3	Jugo de caña que sale de la evaporación 3	kg
TempJCSEvap3	Temperatura jugo de caña que sale de la evaporación 2	°C

IncTEbEvap3	Incremento de temperatura de ebullición evaporación 3	°C
TpromEvap3	Temperatura promedio evaporación 3	°C
TSupEvap3	Temperatura de superficie de la evaporación 3	°C
CpJCSEvap2	Calor específico del jugo de caña que sale de la evaporación 2	kJ/kg*K
TEbEvap3	Temperatura de ebullición de la evaporación 3	°C
CLEvap3	Calor latente evaporación 3	KJ/kg
VPrEVAP3	Vapor producido en la evaporación 3	kg
FlujVPrEvap3	Flujo del vapor producido en la evaporación 3	kg/s
TiempEvap3	Tiempo de la evaporación 3	S
AreaEvap3	Área evaporación 3	m ²
FlujJCEvap3	Flujo de jugo de caña de la evaporación 3	kg/s
PerdTCEvap3	Perdida de transferencia de calor en la evaporación 3	%
QcedEvap3	Calor cedido en la evaporación 3	J/s
QgEvap3	Calor ganado en la evaporación 3	J/s
DeltaTEvap3	Variación de temperatura de la evaporación 3	°C
CoefGlobalTCEvap3	Coefficiente global de transferencia de calor evaporación 3	W/m ² K
QInterEvap3	Calor intercambiado en la evaporación 3	J/s
CoefGlobalTCConcent	Coefficiente global de transferencia de calor concentración	W/m ² K
CpJCSEvap3	Calor específico del jugo de caña que sale de la evaporación 3	kJ/kg*K
ConsMP	Consumo de materia prima (Caña)	kg caña/kg miel
ConsJC	Consumo de jugo de caña	kg Jugo de caña/kg miel
ConEnerg	Consumo de energía	J/kg de miel

VRS	Vertimiento de residuos solidos	kg bagazo, bagacillo/kg miel
ResG	Residuos gaseosos	kg vapor/kg de miel
CostoAdqEquiposRef	Costo de adquisición referencial	\$
RangFAOCostAdq	Rango de costo de adquisición de equipos según la FAO	\$/kg
CostoAdqEquiposRef	Costo de adquisición de equipos referencial	\$
IndCostAct	Indicador de costo actual	
IndCostRef	Indicador de costo referencial	
CostInstalac	Costo de instalación	\$
PorcientoCostInstalac	Porcentaje del costo de instalación	%
CostInstrum	Costo de instrumentación	\$
PorcientoCostInstrum	Porcentaje del costo de instrumentación	%
CostTuber	Costo de tuberías	\$
PorcientoCostTuber	Porcentaje del costo de tuberías	%
CostInstalelec	Costo de instalación eléctrica	\$
PorcientoCostInstalelec	Porcentaje del costo de instalación eléctrica	%
CostEdif	Costo de edificio	\$
PorcientoCostEdif	Porcentaje del costo de edificio	%
CostPrepterreno	Costo de preparación de terreno	\$
PorcientoCostPrepterreno	Porcentaje del costo de preparación de terreno	%
CostRequerimProces	Costo de requerimientos del proceso	\$
PorcientoCostRequerimProces	Porcentaje del costo de requerimientos del proceso	%
CostTerrenos	Costo del terreno	\$
PorcientoCostTerrenos	Porcentaje del costo del terreno	%
CostosDirectInvers	Costos directos de inversión	\$
CostIngenysupervis	Costos de ingeniería y supervisión	\$
PorcientoCostIngenysupervis	Porcentaje del costo de ingeniería y supervisión	%

Gastosconstruct	Gastos de construcción	\$
PorcientoGastosconstru ct	Porcentaje del gasto de construcción	%
CostosIndirectInvers	Costos indirectos de Inversión	\$
Honorarios	Honorarios	\$
PorcientoHonorarios	Porcentaje de honorarios	%
Imprevistos	Imprevistos	\$
PorcientoImprevistos	Porcentaje de imprevistos	%
CapitalTrabajo	Capital de trabajo	\$
PorcientoCapitalTrabaj o	Porcentaje del capital de trabajo	%
CapitalTotalInvertido	Capital total invertido	\$
CostAnuCa	Costo de caña anual	\$/año
PrecCa	Precio de la caña	\$/kg
MontAnuCa	Requerimiento anual de caña	kg/año
CostLabAnu	Costo anual de mano de obra	\$/ año
NumOpPar	Numero de operarios por lote	
NumTurnosTrab	Numero de turnos por trabajador	
CostOpH	Costo de operarios por hora	\$/hora
DiasdTrabAnho	Días de trabajo al año	
MVapEvap1	Masa de vapor en el evaporador 1	kg
MVapEvap2	Masa de vapor en el evaporador 2	kg
MVapEvap3	Masa de vapor en el evaporador 3	kg
LandaVapQced	Calor latente del vapor consumido	kJ/kg
ReqAnuVap	Requerimiento anual de vapor	kg
CostUtilAnuVap	Costo anual de vapor	\$/ año
CostUnitVap	Costo unitario de vapor	\$/kg
CostTFacAux	Costo de facilidades auxiliares	\$/ año
SupOp	Supervisión operativa	\$/ año
MantYRepar	Mantenimiento y reparación	\$/ año
SuministrOp	Suministros operativos	\$/ año

CargLab	Cargos por laboratorio	\$ / año
ImpuestPropied	Impuestos por propiedad	\$ / año
Seguro	Seguro	\$ / año
CargosFij	Cargos fijos	\$ / año
PlantSupGen	Planta superior general	\$ / año
Admisnitr	Administración	\$ / año
CostTProductSinDepreciacion	Costo total del producto sin depreciación	\$ / año
Regalías	Regalías	\$ / año
CostVariables	Costos variables	\$ / año
CostFabricacion	Costos de fabricación	\$ / año
DistribyVents	Distribución y venta	\$ / año
InvestyDesarrollo	Investigación y desarrollo	\$ / año
Gastgenerales	Gastos generales	\$ / año
IngNeg1	Ingresos iniciales	\$ / año
EgNeg1	Egresos iniciales	\$ / año
FlujCNeg1	Flujo de caja inicial	\$ / año
Ing0	Ingresos en el año cero	\$ / año
Eg0	Egresos en el año cero	\$ / año
FlujC0	Flujo de caja en el año cero	\$ / año
Ing1	Ingresos en el año uno	\$ / año
Eg1	Egresos en el año uno	\$ / año
FlujC1	Flujo de caja en el año uno	\$ / año
Ing2	Ingresos en el año dos	\$ / año
Eg3	Egresos en el año dos	\$ / año
FlujC2	Flujo de caja en el año dos	\$ / año
Ing3	Ingresos en el año tres	\$ / año
Eg4	Egresos en el año tres	\$ / año
FlujC3	Flujo de caja en el año tres	\$ / año
Ing4	Ingresos en el año cuatro	\$ / año

Eg4	Egresos en el año cuatro	\$ / año
FlujC4	Flujo de caja en el año cuatro	\$ / año
Ing5	Ingresos en el año cinco	\$ / año
Eg5	Egresos en el año cinco	\$ / año
FlujC5	Flujo de caja en el año cinco	\$ / año
Ing6	Ingresos en el año seis	\$ / año
Eg6	Egresos en el año seis	\$ / año
FlujC6	Flujo de caja en el año seis	\$ / año
Ing7	Ingresos en el año siete	\$ / año
Eg7	Egresos en el año siete	\$ / año
FlujC7	Flujo de caja en el año siete	\$ / año
Ing8	Ingresos en el año ocho	\$ / año
Eg8	Egresos en el año ocho	\$ / año
FlujC8	Flujo de caja en el año ocho	\$ / año
Ing9	Ingresos en el año nueve	\$ / año
Eg9	Egresos en el año nueve	\$ / año
FlujC9	Flujo de caja en el año nueve	\$ / año
Ing10	Ingresos en el año diez	\$ / año
Eg10	Egresos en el año diez	\$ / año
FlujC10	Flujo de caja en el año diez	\$ / año
a	Sumatoria de los flujos de caja	\$ / año
VAN	Valor actual neto	\$
TIR	Tasa interna de retorno	%/año
Pr	Periodo de recuperación de la inversión (PAYBACK)	Años
IngTotal	Ingresos totales	\$
EgTotal	Egresos totales	\$
MargenGanancias	Margen de ganancias	%
V	Viscosidad	
S	Sabor	

C	Presencia de cristales	
X ₁	pH	
X ₂	°Brix	
Z	Calidad del nivel sigma	
Z _{DPU}	Distribución normal correspondiente a los DPU	estándar
DPU	Defectos por unidad	Unidades
DPMO	Defectos por millón de oportunidades	Unidades

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En Ecuador en el 2019, la superficie plantada de cultivos permanentes fue de 1' 543 334 hectáreas, distribuidas en cacao 39,00%, palma africana 15,98%, banano 12,34%, plátano 10,38%, otros cultivos permanentes 14,12% y caña de azúcar 8,18%, destinado a la producción de caña de azúcar 9 258 miles de toneladas métricas. La superficie plantada de caña de azúcar para azúcar fue de 126 246 hectáreas representando el 91,76% y para otros usos (alcohol etílico, panela y melaza) fue de 17 870 hectáreas ocupando el 8,24% (INEC, 2020). En la Región Amazónica, en la provincia de Pastaza, se cultiva caña de azúcar en zonas rurales. Por lo tanto, hay disponibilidad de materia prima. Las familias en vista de la superación económica y aprovechamiento de cultivos han desarrollado emprendimientos dedicados a la producción de panela, etanol y miel.

La producción se basa en el conocimiento empírico lo que ha generado impactos negativos en aspectos como la calidad y lo económico. Por ejemplo, los productos terminados, tienen variaciones constantes en características físico-químicas y organolépticas, por la ausencia de un sistema de producción estandarizado en cada panelera y destilería. Bajo estas condiciones tecnológicas las paneleras logran la venta de sus productos, pero no alcanzan un incremento de la demanda y venta total.

Las paneleras locales elaboran panela en bloque, granulada y miel de manera artesanal, sin considerar puntos de control en la manufactura, calidad y las oportunidades en el mercado; con baja producción y productos de constante variabilidad en los atributos de calidad por ausencia del control de parámetros, provocando un bajo costo del producto afectando al crecimiento económico de agricultores, mercado y productores (Briñez Javela, Ramírez Navas, y Bolaños Cardona, 2018).

Actualmente las paneleras ubicadas en Pastaza elaboran productos con características nutricionales que pudiesen atraer al mercado. Sin embargo, para incrementar su calidad y sus ventas poseen ciertas restricciones operacionales. Por ejemplo, no controlan variables del proceso como el color, pH, °Brix, temperatura y tiempo, esta falta de control afecta el precio, la aceptación y tiempo de vida útil de la producción de miel. Este proceso se realiza mediante los gases de combustión en un sistema abierto que interviene la transferencia de

calor, representado por el coeficiente global de transferencia de calor (U) (Aldana y La Madrid, 2013).

La facilidad de modelos construidos con parámetros y fórmulas, permite tener resultados de calidad. La modelación matemática aplicada al análisis de procesos tecnológicos agroindustriales, permite la toma de decisiones y el incremento de la calidad del proceso. El diseño del modelo de simulación, comprende un grado de complejidad por la recolección de información, que va a depender del nivel de detalle a obtener, entre más detallado sea el análisis involucra la incertidumbre de datos y criterios (Herrera y Becerra, 2014).

La miel posee una variación notable en los atributos de calidad tales como viscosidad, sabor y presencia de cristales, como consecuencia de la no disponibilidad de un sistema de producción estandarizado en variables de la materia prima y proceso que son pH, °Brix, temperatura y tiempo. Lo que genera una preocupación económica e interés, establecer valores adecuados de las variables para mejorar los atributos de calidad de la miel, enfocado en la línea de investigación de desarrollo de procesos agroindustriales.

1.1. PROBLEMA CIENTÍFICO

¿Cómo reducir la variabilidad de los atributos de calidad de la miel de caña de azúcar y así mejorar la factibilidad del proceso de obtención?

1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

La optimización del proceso de obtención de la miel reducirá la variabilidad de sus atributos de calidad y por consiguiente mejorará la factibilidad del proceso.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Optimizar el proceso de obtención de la miel de caña de azúcar utilizando una modelación matemática para mejorar los atributos de calidad del producto final.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Modelar el proceso y los atributos de la miel de caña de azúcar.
2. Simular el proceso de obtención de la miel, utilizando el software *Octave* bajo condiciones de incertidumbre.

3. Determinar el valor de los parámetros operacionales a través de la optimización del proceso de obtención de la miel.

CAPÍTULO II. REVISIÓN BILIOGRÁFICA

2. FUNDAMENTACIÓN CONCEPTUAL Y TEÓRICA

La panela o el azúcar no centrífugo, nombre técnico empleado por la Organización para la Agricultura y la Alimentación, este producto se presenta en bloque o en molde de cualquier forma o granulada (Codex Alimentarius, 2018). La miel se obtiene por evaporación del jugo de caña de azúcar del género *Saccharum spp*, es rica en nutrientes por no ser sometido a procesos de centrifugación y purificación, que mantienen sus elementos: sacarosa, fructosa, fenoles, flavonoides, minerales y vitaminas (Jaffé, 2012; Quezada, Quezada Torres, y Molina Borja, 2018).

La miel es un edulcorante con potencial antioxidante y antiinflamatorio por la presencia de compuestos polifenólicos. Producto consumido en bebidas, apetecidos por atletas por el alto contenido de energía, en países en desarrollo son consumidos en la etapa prenatal, en los niños para prevenir la anemia por el contenido en hierro y calcio, especialmente en personas de tercera edad para evitar la osteoporosis (De María, Corral, y Jaffé, 2013).

Se denomina miel al jugo de caña de azúcar que es sometido a la etapa de evaporación que elimina más del 80% del contenido de agua y alcanza una concentración de sólidos solubles totales aproximadamente 54,5 °Brix. La miel a temperatura entre 123 °C y 128 °C logra concentrar desde 92 a 95 °Brix. Producto constituido por azúcares invertidos y sacarosa, viscoso, soluble al agua, translúcido, sabor agridulce, el color va desde claro brillante hasta amarillo ámbar. El producto se enfría, agita y airea hasta lograr la solidificación de la miel, transformándose a panela (Mendieta Menjura y Hernández, 2013; Quezada Moreno, Gallardo Aguilar, y Quezada Torres, 2015).

La composición física y química de la miel es agua de 30 a 36%, sacarosa de 40 a 60%, componentes invertidos de 15 a 25%, calcio 0,3%, hierro de 8,5 a 10 mg/100 mg, fósforo de 0,5/100mg, proteína de 0,1/100 mg y vitamina B de 14/100 mg. El contenido de sólidos solubles están entre 65 a 75 °Brix, carbohidratos 76,6%, sacarosa de 80 a 90%, bajo en proteínas, energía de 2,85 Mcal/kg. Con tiempo de estabilidad de 8 a 10 días (Quezada Moreno, González Suárez, Torres Quezada, y Aguas, 2016).

La concentración final de la miel permite determinar la calidad del producto que se refleja en las variables: color, viscosidad, sabor, presencia de cristales, olor y composición (Quezada y col., 2018).

El uso de hornillas es considerado como el más simple de los procesos de producción de panela y miel, aunque existen procesos tecnificados por el reemplazo de la cámara de combustión a caldera con el propósito de generar vapor, que será ocupado en el proceso (Osorio Saraz, Ciro Velasquez, y Espinosa Bedoya, 2010).

La eficiencia energética de una hornilla panelera varía entre el 30% y 40%. Por ello, se usa otros materiales: madera, carbón y llanta para combustible, como consecuencia de su misma composición desencadenan problemas ambientales y afectan directamente al incremento del costo de producción. Las cámaras de combustión han sido diseñadas de forma empírica (Sánchez Castro y Mendieta Menjura, 2014).

Brasil es el principal productor de caña de azúcar, entre otros representando más del 50%. Ecuador, país en desarrollo representa un porcentaje no significativo del 0,5% comparado a nivel mundial, representando 52 527,2 ha., Pastaza cuenta con 4500 ha., que se utiliza para la elaboración de panela en bloque y granulada, aguardiente, miel y como fruta (Sablón Cossío, Pérez Quintana, Acevedo Suárez, Chacón Guerra, y Villalba Pozo, 2016). Según INEC (2019), la caña de azúcar cultivada es de 101 898 hectáreas, el 0,2% incluye la Provincia de Pastaza.

Las paneleras elaboran panela en bloque, granulada y miel de manera artesanal, sin considerar puntos de control en la manufactura, calidad y las oportunidades en el mercado; con baja producción y productos de constante variabilidad en los atributos de calidad por ausencia del control de parámetros, provocando un bajo costo del producto afectando al crecimiento económico de agricultores, mercado y productores.

2.1. PRODUCCIÓN DE MIEL DE CAÑA DE AZÚCAR

Los modelos matemáticos incluyen las condiciones de materia prima, proceso tecnológico, parámetros operacionales y los atributos de calidad de la miel de caña de azúcar.

2.1.1. Materia prima

La calidad de la caña de azúcar, como materia prima de la miel, puede verse afectada por variables fisicoquímicas, microbiológicas y organolépticas. Las principales variables son el

°Brix y el pH. Para mejorar los atributos de calidad de la miel, se recomienda el cumplimiento de las Buenas Prácticas agrícolas, el control de la adición de clarificante (cadillo), y lograr la estabilidad de 18 °Brix de la caña de azúcar (Mosquera, Carrera, y Villada, 2007).

La caña de azúcar, una vez cosechada es susceptible a formación de sustancias coloreadas, desde su proceso hasta la miel final. El tiempo de espera entre el corte y molienda debe ser menor a 10 horas para evitar la generación de color (Alfaro Herrera, García Cárcamo, y Renderos Arrué, 2015). Las principales fuentes de color son los compuestos fenólicos, por contener flavonoides, aminoácidos y azúcares reductores (Alfaro Herrera y col., 2015). Los flavonoides incrementan a gran velocidad el color de los cristales de sacarosa en soluciones o jugo diluido en pH entre 7,0 y 9,0 (De María y col., 2013).

El control de pH resulta crítico para evitar la inversión de la sacarosa y pérdida de azúcar al final del proceso. Esta enzima se activa desde los 25 °C hasta los 55 °C entre un pH de 4,5 a 5,0 (Lázaro y col., 2011). El pH óptimo de la miel que permite obtener un producto de buena calidad varía entre 3,5 a 4,5 (Quezada Moreno y col., 2016).

2.1.2. Parámetros de operación del proceso producción de la miel de caña

En el proceso de la obtención de la miel, los parámetros que influyen en la incertidumbre son los °Brix, pH, temperatura, presión y flujo. El grado de madurez adecuado en la etapa del punteo, se concentra entre los 74-78 °Brix, hasta 90-94 °Brix, para alcanzar el punto de miel y panela, respectivamente. El tiempo de batido y el volumen alcanzado por las mieles depende de la textura que está directamente relacionada con los °Brix y pureza de las mieles. La cera tiene un efecto antiespumante se adiciona a una concentración de 70 a 75 °Brix (Mosquera y col., 2007).

La temperatura varía durante las etapas de suministro energético como se presenta en las etapas de evaporación del agua presente en el jugo de caña de azúcar. La presión cambia de acuerdo al caso donde se utilizan evaporadores al vacío (Aldana y La Madrid, 2013).

De acuerdo a la metodología unidimensional para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para pailas de hornillas paneleras entre los gases calientes a través de las ecuaciones de transferencia de calor por convección para dicho cálculo, es indispensable hallar las propiedades de los gases de combustión, número de Nusselt, coeficiente de transferencia de calor, transferencia de calor por radiación para obtener el coeficiente global

de transferencia de calor. La modelación de forma exacta es el fenómeno de transferencia de calor entre gases caliente y la paila. El valor va a depender del material de la paila, tipo de paila (Aldana y La Madrid, 2013).

Es necesario estudiar la transferencia de calor de recipientes de diferentes geometrías para analizar en cuál de las geometrías es más eficiente en la transferencia de calor en energía térmica (La Madrid, Marcelo, Orbegoso, Saavedra, y Management, 2016).

La función de la temperatura es acelerar las reacciones en el proceso de coagulación por la aplicación de calor entre las sustancias propias del jugo en el proceso de encalado, facilitando la aglomeración de impurezas y logrando que los sistemas coloidales más sencillos se logren desestabilizar por la deshidratación de la superficie y coadyuva al proceso de concentración de sólidos totales (Briñez Javela y col., 2018).

2.1.3. Atributos de calidad de la miel

Viscosidad

Según Quezada Moreno y col. (2015) en el proceso de evaporación se concentran los sólidos solubles (sustancias dulces del jugo de caña de azúcar) en la miel desde 16 a 21°Brix hasta los 78°Brix. De la concentración final depende el rendimiento, productividad y rentabilidad. La viscosidad se afecta en presencia de una baja concentración e incrementa la fluidez del producto al ser vertido en un recipiente (Quezada Moreno y col., 2016).

Sabor

La aceptación del sabor depende del pH, la aceptación del producto es evidente a pH intermedio y alto, y la concentración °Brix, relacionada la temperatura. Para regular el pH se incorpora ácido cítrico a temperaturas superiores de 95°C. La etapa de clarificación del jugo de caña de azúcar permite obtener un producto final claro y brillante (Quezada Moreno y col., 2016).

Presencia de cristales

La presencia de altos valores en la concentración de °Brix y el pH, incrementa la cristalización en la miel, por la inversión incorrecta de la sacarosa. Una adecuada combinación de las dos variables (alta concentración de °Brix y regulación de pH) da estabilidad al producto disminuyendo la formación de cristalización, (Quezada Moreno y col., 2016).

2.2. MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PROCESOS TECNOLÓGICOS

En el primer modelo matemático se consideró el balance de masa y energía del sistema global del horno, este balance permite determinar el coeficiente global de transferencia de calor, 5 años después se desarrolló el software simple como *Visual Basic*. Al Lagtah, Al Habsi, y Onaizi (2015) Realizaron el proceso de simulación en el programa *HYSYS* con modelo matemático termodinámico. En la actualidad los modelos matemáticos integran más variables del proceso de combustión.

Un modelo es un conjunto de elementos que representan una información de una o más características de un determinado proceso, puede ser una representación aproximada de un sistema de proceso, tipo material o construcción matemática, compuesto de la relación de constantes, parámetros y variables. Los modelos pueden ser de tipo: fenomenológicos o de caja blanca, empíricos o caja negra y combinaciones de fenomenológicos-empíricos o caja gris o semifísicos o semiempíricos. Los modelos fenomenológicos se relacionan con el costo-calidad, se construye bajo un conocimiento detallado de aspectos del fenómeno a modelar (Alvarez, Lamanna, Vega, y Revollar, 2009).

El modelo es base fenomenológica de la estructura de los balances de materias presentes en los procesos, permite encontrar la mejor condición de las variables de: materia prima, proceso y producto, mediante un modelo a través de simulaciones de cada estudio de caso con diferentes escenarios de operación para controlar los procesos y la calidad del producto.

Los modelos matemáticos se pueden aplicar en distintas disciplinas, como en física, química y biología (modelos de Lotka y Volterra) o denominados modelos de la biomatemática o bioinformática (Jacovkis, 2005). Los modelos teóricos necesitan principios de química, física y biología con equilibrio de masa y energía, el más aplicado es el de transferencia de masa, tal como por difusión (Maldonado Maldonado, Márquez Romance, Guevara Pérez, Pérez, y Rey Lago, 2018).

2.2.1. Tipos de modelos matemáticos

Los modelos generan una aproximación más real de un proceso, explican los datos observados, predicen el comportamiento de variables bajo ciertas condiciones, son utilizados para optimizar procesos, con el objetivo principal de reducir el costo de proceso y el tiempo

de un proceso, sin la necesidad de realizar el experimento (Gómez Salazar, Clemente Polo, y Sanjuán Pelliccer, 2015).

Existen dos categorías de modelos matemáticos: determinísticos y estocásticos. En los modelos determinísticos se pueden alcanzar resultados con más exactitud utilizando métodos matemáticos tales, como programación lineal, programación entera mixta y algoritmos. Los modelos estocásticos se basan en el concepto matemático con magnitudes o variables aleatorias que varían en función al tiempo u otra variable (Silva Rodríguez, Díaz Cárdena, y Galindo Carabalí, 2017). El tipo de modelo utilizado fue estocástico, por las variables específicas en el proceso de tecnológico de la producción de miel de caña de azúcar.

Aplicación de modelos en procesos biológicos

Los fenómenos biológicos se describen mediante los modelos matemáticos a partir de ecuaciones de reacción difusión, que describen las interacciones químicas generadas por patrones complejos en el espacio, tales como modelos de morfogénesis de Schnakenberg, modelos de reacción cinética de Gierer-Meinhardt y *Thomas* (González, Venegas, y Garzón, 2009).

Según Venegas, Manga, Abad, y Ribes (2004) mencionan que se utilizó una modelación matemática para optimizar procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales mediante la herramienta informática *DESASS (Desing and Simulation of Activated Sludge Systems)* como simulador en el funcionamiento del sistema de fangos activados en discontinuo (SBR) para la eliminación biológica de materia orgánica y nitrógeno.

Aplicación de modelos en procesos físicos

Según Gómez Salazar y col. (2015) mencionan el uso de los modelos matemáticos para describir la transferencia de masa en el proceso de salazón y curado de carnes y pescados, utilizando los modelos difusionales, con el propósito de analizar los fenómenos que ocurren en el proceso de salazón debido al costo y tiempo. Los modelos matemáticos en alimentos permiten mejorar la comprensión de la dinámica de los procesos y así elaborar una estratégica de control para un nuevo proceso.

Los modelos matemáticos son utilizados para simular procesos de secado de biomasa para obtener energía. Villalba Vidales y Arzola de la Peña (2015) Realizaron una búsqueda de modelos multivariados aplicados en el secado convectivo y conductivo, para predecir la cinética de secado de un material orgánico, existen dos categorías los modelos: mecanísticos

(basados en modelos físicos sólidos) y fenomenológicos (basados en la observación de los modelos físicos). A continuación se detallarán algunos modelos:

Modelos fenomenológicos:

Los modelos más utilizados contienen ecuaciones macroscópicas de transferencia de calor y masa con base en la termodinámica, a la vez la temperatura se relaciona con el contenido de humedad y presión del gas, entre otros modelos que describen el proceso simultáneo de calor y masa en medios porosos (Villalba Vidales y Arzola de la Peña, 2015).

1. Modelos basados en la Segunda ley de *Fick*:

Son utilizados en el secado de productos, en base a la ley de conducción de calor *de Fourier*, que establece que la velocidad de transferencia de masa mediante una unidad de área normal a la selección es proporcional al gradiente de concentración. Existen diferentes modelos de acuerdo al objetivo a predecir; el secado de tablas en pila, secado convectivo de cortes rectangulares de zanahoria, modelos que simulan numéricamente el secado de café en capa delgada, la cinética de secado de muestras cilíndricas de papa y zanahoria, la cinética de secado en pila de 500 kg de cilantro en lecho profundo (sistema combinado de colector solar y de lecho rocoso de almacenamiento de energía) (Villalba Vidales y Arzola de la Peña, 2015).

2. Modelos conservativos:

Se basan en modelos con ecuaciones de conservación de masa, momento y energía. Existen otros modelos para determinar la transferencia de calor y masa de objetos húmedos a secado convectivo, para modelar el secado de chile, banano y café, aplicado a un secador rotativo de biomasa de la industria maderera, para predecir la cinética de secado de partículas de sauce (Villalba Vidales y Arzola de la Peña, 2015).

3. Modelos simplificados:

Se puede simplificar los modelos matemáticos de las ecuaciones de transferencia de calor y masa determinando un valor de difusión constante. Se aplicó modelos para determinar la cinética de secado de papa bajo las diferentes geometrías: cilindro y rebanadas, estudio de secado de rebanadas de mango en lecho fijo, desarrollo de modelo teórico-experimental para verificar la influencia del perfil de velocidad del aire en la cinética de secado, entre otros modelos (Villalba Vidales y Arzola de la Peña, 2015).

Aplicación de modelos en procesos químicos

Según Maldonado Maldonado y col. (2018) indican el desarrollo de modelos para el diseño de filtros ascendentes anaeróbicos separados en dos y tres fases, evaluando el rendimiento de eliminación de DQO en 54 pruebas, aplicando el modelo conceptual con ecuaciones derivadas de un balance de masa en condiciones estacionarias, para obtener parámetros de degradación de materia orgánica, utilizando ecuaciones formuladas para filtros de goteos y ecuaciones anaeróbicas biofiltros.

2.3. SIMULACIÓN DE PROCESOS

La simulación es una herramienta comprendida en la formación y conocimiento, base de una técnica numérica para elaborar, representar los experimentos y/o simulación en un computador de forma digital con tipos diferentes de modelos matemáticos que permiten describir el comportamiento de un sistema económico con la finalidad de maximizar el rendimiento y minimizar costos. La metodología de simulación de procesos es definición del sistema de estudio, elección del software para simular, elaborar modelos matemáticos, ejecución del software, optimización y análisis de la incertidumbre (Herrera y Becerra, 2014).

La aplicación de la modelación matemática, en la actualidad es más sencilla, por la existencia de recursos tecnológicos, como *softwares*, denominados asistentes matemáticos que permiten simular diversos tipos de fenómenos o la experimentación de forma real, con la construcción y uso de los modelos matemáticos (Rodríguez Gallegos y Quiroz Rivera, 2016). La alternativa tecnológica posibilita las simulaciones computacionales para predecir el comportamiento de las condiciones de uno o varios procesos en los atributos de calidad en un producto.

La simulación ha evolucionado con la aplicación de la tecnología de *Building Information Modeling (BIM) 5D*, sirve para realizar simulaciones de procesos constructivos y alternativas del recurso humano para la optimización (Bohórquez Castellanos, Porras Díaz, Sánchez Rivera, y Mariño Espinel, 2018).

La simulación de procesos se desarrolla mediante simuladores comerciales como: *Aspen Plus*, *Hysys*, *Chemcad*, entre otros, programación en *Excel*, *MatLab*, *Visual Basic* u otro lenguaje de programación. La herramienta brinda facilidades a las industrias, especialmente en la industria química y biotecnológica, para facilitar la resolución de los objetivos

planteados en diferentes procesos industriales (Castillo Peña, Labrada Vázquez, Penedo Medina, y Sánchez del Campo lafita, 2013).

2.3.1. Simuladores de procesos

La simulación de procesos permite predecir el comportamiento de procesos con suficiente precisión, a bajo costo y ofreciendo información de interés a industrias para la toma de decisiones (Bon, Clemente, Vaquiro, y Mulet, 2010). Los simuladores de procesos más utilizados son:

Aspen Hysys: Es un simulador de procesos comerciales, conocido a nivel mundial, toma en cuenta la transferencia de masa y el no equilibrio de las reacciones químicas presentes en el proceso. Es utilizado para estudiar, simular y optimizar procesos con reacciones (Al Lagtah et al., 2015). Permite simular procesos industriales, en estado estacionario y dinámico, implementar control, dimensionar operaciones unitarias y estimar costos de equipos (Navarro Pérez y Llerena Chávez, 2016).

Chemchad: Es un simulador de procesos químicos más complejos, especialmente de reacciones en el área petrolera, posee facilidades de automatizar los cálculos a mayor velocidad, con más exactitud, menor probabilidad de cometer errores en uno o varios procesos, mediante la estimación de curvas de equilibrio líquido-vapor (EFV) a diferentes presiones utilizando una única curva como dato (Tarifa, Erdmann, Humana, Franco Domínguez, y Mercado Fuentes, 2008).

Pro Sim Plus: Es un simulador de propósito general, con enfoque modular secuencial en la estrategia de simulación en estado estacionario de procesos. Estudia los efectos producidos por los cambios en un proceso ya existente u optimizar la operación del proceso. Utilizado en el campo de la ingeniería química, en procesos que involucran fluidos, como en el proceso de pasteurización (Bon y col., 2010).

Simteluc: El programa SIMTELUC (SIMulador de Trata-miento de Efluentes Líquidos, Universidad de Carabobo), se utiliza con el objetivo de manejar y almacenar la información pertinente para la simulación de un proceso, y para ello requiere de una serie de arreglos matriciales y vectoriales, específicamente los asociados al manejo de las corrientes de procesos, parámetros de los módulos de cálculo, secuencia de cálculo, entre otros (Pérez, Niño, y Llobregat, 2004).

SuperPro Designer: El simulador facilita la modelación, diseño y optimización multicriterial económica y ecológica de procesos integrados en industrias tales, como farmacéuticas, agroquímicas, biotecnológicas, alimenticias, tratamiento de residuales y purificación de agua; contiene herramientas que permiten la estimación de balances de masa y costos de una planta de forma continua o por lotes (Benítez Cortés, Pérez Martínez, Barrios Rodríguez, Rodríguez Machado, y Pérez Sánchez, 2018).

DESASS: Simulador muy utilizado en plantas de tratamiento de aguas residuales, con una configuración para la plataforma Windows, con diseño para optimizar el estudio de los procesos biológicos, que comprende la eliminación de materia orgánica y nutrientes, por medio del algoritmo presente en la modelación matemática, con bases de un modelo biológico general que tiene como base el modelo de fangos activados número 2 modificado (ASM2d) de la IWA (Venegas y col., 2004).

2.3.2. Asistentes matemáticos utilizados en la simulación de procesos

Los asistentes matemáticos son *softwares* que permiten la facilidad de dar solución a problemas matemáticos, a través del análisis de funciones de manera gráfica de las interacciones de los modelos (Bon y col., 2010). Algunos de estos asistentes y sus características son:

Octave: es en lenguaje con alto nivel en cálculos numéricos, principalmente utilizado en la resolución de problemas tales como, ecuaciones lineales y no lineales, numéricas lineales, álgebra, análisis estadístico, experimentos numéricos, procesamiento automatizado de datos que son ejecutadas en *script*, enfocado en procesos por lotes o *batch* (Eaton, Bateman, Hauberg, y Wehbring, 2020).

Fritzing: es una herramienta utilizada por diseñadores para transformar los modelos diseñados a productos esperados, a través de prototipos y bosquejos del proceso de fabricación de manera más rápida y sencilla (Ping Sung y Chein Hua, 2015).

Matlab: es un software matemático que permite desarrollar cálculos de manera computacional para dar soluciones a problemas planteados y permite visualizar las soluciones de dichos cálculos mediante gráficos. *Matlab* contiene una herramienta llamada *Simulink*, que permite llevar a cabo la simulación facilitando el análisis de los resultados (Vergara, Avilez, y Romero, 2016).

Scilab: está diseñado para realizar simulaciones matemáticas, diseño, estadística, procesos, optimización y permite visualizar los resultados en 2D y 3D. Facilita las manipulaciones de estructuras de datos de alto nivel, con polinomios, números racionales, matrices dispersas, sistemas de variables múltiples (Caron y col., 2001).

Sage: es un programa desarrollado para modelos matemáticos. El objetivo de *Sage* es encontrar una opción viable para obtener los mejores resultados para el problema planteado, presenta un novedoso algoritmo de búsqueda dirigida, con enfoque en conjunto de restricciones para solucionar las restricciones con ejecución simbólica (Godefroid, Levin, y Molnar, 2012).

GeoGebra: es una herramienta que permite resolver problemas matemáticos, mediante el cálculo, geometría dinámica y algebra. Los resultados obtenidos pueden ser visualizados en gráficos. Se basa en la geometría dinámica para la resolución de problemas de geometría analítica formada por sintética y analítica y la expresión algebraica en gráficos (Iranzo y Fortuny, 2009).

Wolfran: es un software matemático complejo, pero de mucha utilidad, es aplicado en áreas de economía, ingeniería, finanzas, ciencias de datos, química, permitiendo resolver procesos de algebra y cálculo, tiene la facilidad de visualizar el procedimiento e imprimir los datos (Vílchez Quesada, 2015).

2.3.3. Metodologías para la simulación de procesos

La metodología para la simulación de procesos está conformada por la definición del sistema de estudio, donde se definen los objetivos, las variables del problema, el software que se utilizará para la simulación, el tiempo de cada etapa del proceso y los resultados que se esperan obtener. La información a recolectar debe ser útil para proceder a la construcción de los modelos, posterior se implementan los modelos desarrollados en el software definido, y seguidamente se valida el modelo mediante comparaciones con datos reales o resultados estadísticos. Al finalizar se realiza un análisis para comparar los resultados de las simulaciones con diferentes condiciones de entrada y determinar el mejor (Herrera y Becerra, 2014).

A juicio de la autora en la revisión bibliográfica, se determinó que las metodologías planteadas para la simulación de procesos, coinciden en la mayoría de las etapas que se deben seguir para realizar la modelación matemática.

En la simulación del proceso de obtención de miel, se tomará como referencia unas condiciones de operación fijas que no son convenientes, por la variabilidad de la materia prima y las condiciones de proceso, es por ello necesario analizar cómo afecta la incertidumbre en el proceso y en los atributos de calidad.

2.4. OPTIMIZACIÓN

La optimización se realiza cuando en el proceso se tiene un grupo de posibles alternativas, se selecciona aquella que cumpla con los objetivos planteados. Es una herramienta necesaria para llevar a cabo el diseño de un proceso (Xing, Luo, y Gao, 2020).

La optimización en los procesos agroindustriales tiene el propósito de disminuir costos, incrementar la calidad de productos y minimizar el impacto al medio ambiente. El desarrollo de estas herramientas se debe al crecimiento de la disponibilidad de computadoras y mejora en la capacidad de realizar cálculos, facilitando la aplicación de modelos matemáticos de tipo económico y de operaciones físicas. Los problemas de optimización usualmente se basan en tres componentes principales que se detallan a continuación (Scenna y col., 1999):

- La función objetivo, es la ecuación que describe el funcionamiento del sistema a optimizar, con la función a maximizar o minimizar.
- Los problemas de optimización se componen por las variables, dependientes e independientes, y estos representan las decisiones a tomar en el resultado de la función objetivo.
- Las restricciones, son consideradas como el grupo de relaciones o límites que las variables deben cumplir.

Se logra optimizar cuando los valores obtenidos satisfagan las restricciones y conviertan en óptima a la función objetivo.

2.4.1. Métodos de optimización

Los métodos de optimización, se clasifican por los modelos matemáticos elaborados en la función objetivo, entre estos son:

Método clásico: es conocido como optimización matemática, está compuesto por un grupo de respuestas, métodos numéricos y analíticos, orientados a localizar el mejor resultado de entre una serie de alternativas. La solución de un problema consiste en minimizar o

maximizar una función objetivo. En este método se utiliza un cálculo diferencial, donde se determinan las coordenadas del punto óptimo (Gutiérrez y Vidal, 2008).

Matriz de *Hess* sin restricción: se utiliza para resolver funciones de dos o más variables con derivadas parciales organizadas en una matriz. El orden de la matriz depende de la cantidad de variables presentes en la función, previo a encontrar los mínimos y máximos, se debe determinar la derivada de cada una de las variables de la función, igualarlas a cero para obtener sus coordenadas y hallar el punto crítico, y así determinar las segundas derivadas, para formar la matriz de *Hess* (Scenna y col., 1999).

Multiplicadores de *Lagrange*: es el procedimiento de encontrar los máximos y mínimos de funciones con varias variables con restricciones, con el propósito de reducir el problema restringido a uno sin restricciones de varias variables, y estas sean más sencillas de resolverse. Las nuevas variables escalares desconocidas, para cada restricción, son llamadas multiplicadores de *LaGrange* (Cruz Trejos, Medina Varela, y Salazar Arias, 2013).

Programación lineal: en este modelo las restricciones y la función objetivo son lineales, donde una solución local pasará a ser la solución total del problema. El método más utilizado para la resolución factible de este tipo de problemas es el *simplex* (Scenna y col., 1999).

Simplex: es un método repetitivo, sencillo y práctico, con el propósito de mejorar la solución, trabaja con los coeficientes presentes en las restricciones y en la función objetivo. Los valores óptimos se alcanzan cuando ya no se pueda mejorar la solución, reduciendo significativamente la cantidad de puntos a analizar (García Ligeró y Román, 2011). Este método está compuesto por una función, variables del problema y restricciones para resolver el problema, previo a la ejecución el problema se debe convertir en ecuaciones, las restricciones y las variables deben ser positivas (García Ligeró y Román, 2011).

Programación no lineal: se caracteriza porque las restricciones y la función objetivo se presentan como funciones no lineales, donde la solución óptima puede ser cualquier punto que se encuentre en la zona factible. Los métodos más utilizados son (Scenna y col., 1999):

- a) Gradiente hacia adelante: este método utiliza una búsqueda en dirección del gradiente.
- b) Gradiente hacia atrás: radica en realizar actualización de forma repetida en las variables, utiliza la dirección contraria del gradiente, para que el problema se minimice, y así encontrar el resultado óptimo. La dirección del movimiento está dada

por el gradiente negativo, pero la longitud del mismo movimiento no está dada por el gradiente.

Programación dinámica: Se utiliza cuando un proceso tiene objetivos cambiantes, los modelos son dinámicos y no de tipo estacionarios, se basan en modelos dinámicos por funcionar durante las perturbaciones transitorias, permite minimizar costes y mejorar la producción (Kroll, Havre, Modén, y Hess, 2001).

Facilita una plataforma para desarrollar simulaciones que brindan alta precisión, optimización a tiempo real, optimización dinámica, control predictivo basado en modelos, la armonización de datos, las mediciones de inferencia y las mezclas. Los modelos sirven para gestionar, configurar modelos, aplicaciones, y visualizar gráficamente los resultados. Los modelos dinámicos no lineales, de carácter riguroso pueden proporcionar la precisión requerida (Kroll y col., 2001).

2.4.2. Metodologías para la optimización

Scenna y col. (1999) plantean que para resolver problemas de optimización se deben seguir los siguientes pasos:

1. Identificar las variables de decisión: estas variables representan las variables de decisión del problema.
2. Identificar y/o establecer las restricciones: las restricciones determinan los valores que pueden ser empleados por las variables de decisión.
3. Definir los objetivos: los objetivos son establecidos por la persona que lleva a cabo el proceso de optimización. Se podría considerar el planteamiento de un único o varios objetivos.
4. Analizar la información: la información disponible ayudará a definir la decisión final. Si el valor de los parámetros se conoce, la decisión que se tomará será la de minimizar o maximizar.

El primer paso para elaborar un modelo es establecer las variables de decisión, función objetivo con relación a lo que se desee optimizar, establecer las restricciones, estas establecen las limitaciones o las condiciones que el problema tiene que cumplir para ser solucionado (Téllez Mora, Peraza Luna, Feria Velasco, y Andrade González, 2012).

Las metodologías de optimización se enfocan en adecuar un conjunto de elementos para mejorar el resultado planteado por una función objetivo (Peñuela Meneses y Echeverri, 2007).

2.5. INCERTIDUMBRE

La incertidumbre en la modelación fenomenológica se presenta en la interacción que no puede predecirse con exactitud. La complejidad de la incertidumbre existe cuando se tiene que elegir una o varias de entre un conjunto de alternativas planteadas en el modelo matemático. La calidad de un modelo se evalúa por el grado de su complejidad descriptiva y de incertidumbre. Las teorías de incertidumbre son generadas por deficiencia de información o ambigüedad y lingüística o vaguedad (Sierra y Álvarez, 2007).

El concepto de la incertidumbre, es la incapacidad de anticipar acciones, sucesos de un entorno determinado por una persona o proceso. Al mencionar baja incertidumbre se entiende a la mejora del control de una situación, producto o proceso. Incluye dos argumentos: epistemológicos (la imposibilidad de conocimiento verdadero sobre el futuro) y ontológico (una indeterminación fundamental y apertura del futuro) (Ramírez De La O, Nava Bernal, Osorio García, y Franco Maass, 2011).

Tipos de incertidumbre por sus orígenes:

- a) A nivel de datos: al tener datos incompletos o imperfectos.
- b) A nivel de dinámicas: por el desconocimiento, inseparabilidad del todo, emergencia por defectos inesperados.
- c) Por extrapolación al futuro: dependencia de supuestos.

La incertidumbre es epistémica por la ausencia de conocimiento completo que se reduce con la incorporación de evidencias, generando la credibilidad y decisiones, y conceptual por el significado incompleto, se puede mejorar con elaboración de conceptos basados en el pensamiento y decisiones. La incertidumbre por variabilidad se debe a la aleatoriedad natural presente en un proceso (Ramírez De La O y col., 2011).

La incertidumbre se puede aplicar en los siguientes casos:

- a) Incertidumbre discrecional o situacional, se enfoca a situaciones específicas de una actividad que se va a realizar, cuando la respuesta que se obtiene genera una

incertidumbre sobre si el resultado de la conducta es o no eficaz (Pinazo Calatayud, 2006).

- b) Incertidumbre en un terreno ecológico, se relaciona con estocasticidad y en estructuras disipativas, la impredecibilidad por la indeterminancia e incertidumbre. Existe la incertidumbre extrema que no es fácil reducir con aspectos técnicos y es imposible con técnicas computacionales (Ramírez De La O y col., 2011).
- c) Mora y Granados (2012) Mencionan, dos tipos de incertidumbre: 1) ignorancia, se presenta por errores en la medición, incorrecta decisión sobre un modelo matemático y el complejo nivel de abstracción del mismo. 2) variabilidad, es la estocasticidad, por la variación espacial y la diferenciación individual.

La incertidumbre se aplica en un diseño de proceso, cuando se la describe de forma clara y precisa, a través de opiniones e información de los parámetros tales, como intervalos, estimar los límites inferior y superior, y se relaciona con la optimización utilizando el principio de toma de decisiones o simulaciones óptimas. La incertidumbre se reduce por el uso de herramientas denominada teoría de probabilidades (Mora y Granados, 2012).

2.5.1. Distribución de probabilidad

En la evaluación de incertidumbre se obtienen valores de variable aleatoria discreta o continua de una medición desde el punto de vista de los tipos de distribución de probabilidad. Los tipos de distribuciones son Rectangular, Triangular, Normal, *t-Student*, *Beta*, *Weibull*, etc. El tipo de distribución a utilizar dependerá del tipo de datos obtenidos (Batanero, 2005).

Distribución normal: es una de las distribuciones de variables continuas más utilizadas en los campos de las ramas empíricas, basado en métodos estadísticos, la media y la desviación estándar son los parámetros que definen esta distribución (Pérez Hernández, 2012).

Distribución *Beta*: esta distribución es para variables que toman valores en un rango entre 0 y 1, esto hace que sea adecuada para la modelación de proporciones. Esta distribución puede ajustarse a una gran diversidad de distribuciones empíricas, es por esto que las representaciones que adopta, estarán en dependencia de los valores de la forma (Pérez Hernández, 2012).

Distribución *Weibull*: Esta distribución es utilizada en la modelación de situaciones que describan el tiempo de vida o analizar la supervivencia. Los parámetros que definen esta

distribución son la escala y la forma, en casos específicos en los que la forma sea igual a 1 se conoce como distribución exponencial, y si la forma es igual a dos y la escala igual a la raíz de dos por la desviación estándar es una distribución de *Rayleigh* (Pérez Hernández, 2012).

Distribución de *Poisson*: El modelo de *Poisson* es utilizado a partir de experimentos realizados y que estos han sido repetidos un número finito de veces, pero la probabilidad de éxito es muy reducida. Esta distribución establece la probabilidad de que un número de situaciones ocurran dentro de un tiempo determinado, si no se encuentran en dependencia del tiempo desde el último evento y si los eventos acontecen con un valor medio conocido. La distribución puede ser expresada de manera gráfica a través de diagrama de barras asimétricamente positiva (Pérez Hernández, 2012).

Al realizar la modelación, simulación y análisis de la incertidumbre en cuanto a los parámetros de operación, es necesario seleccionar la alternativa que cumpla con los objetivos planteados y permita obtener los resultados esperados, mediante la optimización.

2.6. DISEÑO DE PROCESO Y CALIDAD

El diseño de procesos se refiere al proceso a través del cual se crean estos, aplicando métodos de economía, ingeniería y principios de la ciencia, con el propósito de crear, elegir y ordenar un conjunto de operaciones que sean capaces de transformar en producto terminado las materias primas. El diseño de procesos se puede realizar por medio de dos estrategias (Medina, 2011):

La primera, el método de jerarquía de decisiones planteado por *Douglas*, que consiste en desdoblarse un problema en otros más pequeños, con la finalidad de obtener soluciones sencillas y poco a poco añadir detalles. Los niveles planteados por *Douglas* son:

1. Definir si la producción se dará en *batch* o en continuo.
2. Determinar la estructura de las corrientes tanto de entrada como de salida: materias primas e insumos que ingresan y salen del proceso.
3. Considerar la presencia de corrientes de reciclaje: se refiere a recuperar o eliminar ciertos componentes de interés.
4. Especificar la estructura del sistema de separación: se basa en la recuperación de no menos del 99% de los componentes valiosos.
5. Red de intercambio de calor: integración de las fuentes de calentamiento y enfriamiento.

La segunda, la modelación y programación matemática, donde se tendrá en cuenta los equipos que intervienen, así como las condiciones en las que se produzca el proceso, con la finalidad de resolver los problemas planteados.

El término calidad hace referencia a la fabricación de productos que cumplan con especificaciones que sean capaces de satisfacer las necesidades de los consumidores y que carezcan de deficiencias, y a la vez permita diferenciar el producto de otros similares, en condiciones de elaboración que representen costos mínimos (Wen y Siqin, 2019). La calidad de la miel está definida por el °Brix, pH, sabor, presencia de cristales y viscosidad, aunque, la calidad puede verse afectada por: el grado de madurez de la caña de azúcar, períodos excesivos desde el corte a la extracción del jugo, el tiempo y la temperatura en las etapas de suministro energético, presencia de sobrenadante y malas prácticas de higiene (Silva, Silva, Perestrelo, Nunes, y Câmara, 2018).

En el diseño de procesos de miel se abarcan aspectos como es el caso de los diagramas de procesos con su respectiva descripción, los cálculos correspondientes a los balances de masa desarrollados en cada una de las etapas de los diferentes procesos, balances de energía realizados en las etapas de suministro energético, dimensionamiento de los equipos y un análisis económico del equipamiento y el proceso (Medina, 2011).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. LOCALIZACIÓN

El proyecto se realizó en la provincia de Pastaza, cantón Puyo, en el barrio Intipungo en el domicilio, ubicado entre calles Severo Vargas y Ceslao Marín en la ciudad de Puyo, por la emergencia sanitaria. La investigación duró 400 horas para la obtención de datos, simulación, optimización y análisis de la incertidumbre.

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Investigación descriptiva

Se indagó investigaciones sobre tecnologías, factores, procesos, variables entre otros parámetros, la revisión permitió construir una data de las variables y plantear los balances de masa y energía, modelos matemáticos que describen el comportamiento de la calidad de la miel.

Los resultados de las investigaciones sirvieron para describir sobre la tecnología, subdivisión de tareas, niveles de orden jerárquico, toma de decisiones, y capacidad de innovación (Hernández Sampieri, Fernández Collado, y Baptista Lucio, 2010).

3.2.2. Investigación predictiva

La investigación predictiva tuvo la finalidad de controlar el fenómeno o hecho que se va a estudiar, con el objetivo de anticipar situaciones futuras. Inicia con la descripción del porqué de la causa que produce la variación a los atributos de calidad. En la predicción de variables en la simulación en condiciones controladas se analizó y comprendió la interacción de las variables y optimización. Esta investigación indagó experimentos, simulaciones fundamentadas sobre temas de la línea de investigación del proyecto, para el desenlace de una investigación objetiva y veraz (Rocha Muñoz, 2015).

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

3.3.1 Método de modelación

El método de modelación se sustentó a partir del desarrollo del modelo matemático que permitió crear de forma abstracta la interacción de variables independientes en la calidad, con el objeto de tener una visualización más clara del objetivo a resolver mediante el *software Octave*. Permitted obtener características fundamentales y relaciones de las variables independientes en la respuesta, mediante la simulación de condiciones de materia prima y procesos diferentes, basadas en condiciones existentes con el propósito de establecer los rangos y valores óptimos de los atributos de calidad de la miel de caña de azúcar

3.4. METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DEL PROCESO

La optimización del diseño del proceso se efectuó en tres etapas denominadas (modelación matemática, simulación, y optimización) a través de la metodología representada en la Figura 1. Cada una de las etapas se validó. En la etapa de modelación se validaron los modelos comparándose con lo reportado en la literatura por Peters, Timmerhaus, y West (2003); Quezada Moreno y col. (2016), posterior la simulación a partir de las condiciones que se utilizaron de la literatura planteada por Quezada Moreno y col. (2016) se compararon con los resultados obtenidos para ver si existían resultados similares y por último la optimización, si tenía sentido físico los resultados obtenidos.

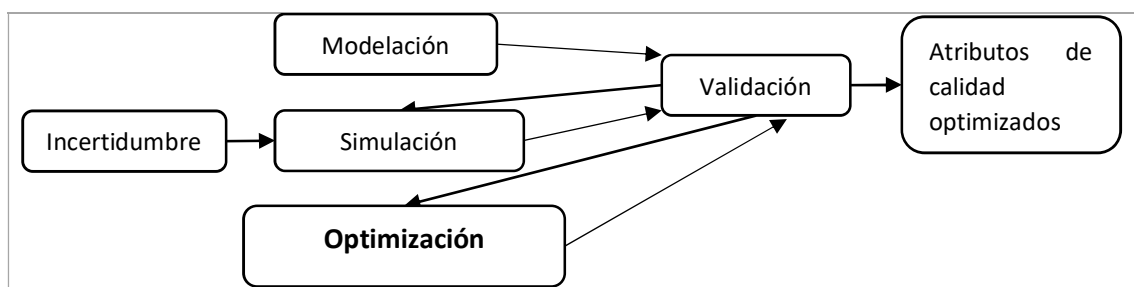


Figura 1. Pasos para la simulación matemática.

Fuente: Elaboración propia

3.4.1. Etapa de modelación

La etapa de modelación matemática del proceso de obtención de miel de caña de azúcar estuvo integrada por dos fases:

Fase 1: Identificación de los fenómenos (operaciones) que se desarrollan en el proceso de producción de miel.

En el proceso de obtención de la miel, existen fenómenos en operaciones unitarias tales, como molienda (reducción de tamaño), filtración (separación de sedimentos), calentamiento (procesos de reacciones) y evaporación (eliminación de agua presente en el jugo de caña de azúcar por la transferencia de energía), en todas las operaciones unitarias existieron fenómenos en el proceso de transformación de la materia prima. El reconocimiento de fenómenos, ecuación de diseño de equipo y los atributos de calidad con nivel sigma mayor a tres presentes en el proceso permitió determinar el tipo de modelos a desarrollar (Brito Vallina, Alemán Romero, Fraga Guerra, Para García, y Arias de Tapia, 2011).

Fase 2: Desarrollo de modelos.

Para el diseño del proceso se establecieron:

- a) El modelo matemático de balance de masa y energía en estado estacionario y dimensionamiento de equipos. Los fenómenos identificados en el proceso, permitieron aplicar los siguientes modelos: modelos de *Fourier* en los fenómenos de transferencia de energía y el modelo de Ley de Lomonósov-Lavoisier, en el fenómeno de transferencia de masa (Bird, Stewart, y Lightfoot, 1992).
- b) Los modelos que describen la calidad en términos de sus atributos (viscosidad, presencia de cristales y sabor)
- c) Los modelos que describen la incertidumbre. En los parámetros operacionales de la miel se empleó la distribución Beta, con el objetivo de calcular el nivel sigma con criterio de calidad sigma mayor a tres, identificando los productos aceptados y defectuosos, para incrementar los aceptados y disminuir los defectuosos y mejorar la calidad de producto final (Santos Fernández, 2012).
- d) Los modelos económicos para la estimación del costo de inversión, costo de producción, flujos de caja y los indicadores dinámicos económicos, los modelos utilizados son clásicos de la literatura de ingeniería de procesos propuestos por Peters y col. (2003). Los modelos matemáticos se desarrollaron de acuerdo a las características del problema que se analizó para después ser utilizados en los scripts para la simulación.

3.4.2. Simulación

Se establecieron los límites de aplicación de los modelos matemáticos establecidos en la fase 2 de la etapa de modelación. Dentro del proceso de obtención de la miel de caña de azúcar se enfocó en las variables de la materia prima como °Brix y pH para realizar la simulación.

Para el desarrollo de la simulación, se establecieron las condiciones de materia prima y proceso para la obtención de la miel, las condiciones se reemplazó en modelos matemáticos para la aplicación del software matemático *Octave*, de forma aleatoria y fija las condiciones para visualizar las iteraciones de las variables según (Brito Vallina y col., 2011).

3.4.3. Optimización

Los pasos llevados a cabo durante la optimización fueron:

Paso 1. Formulación del problema:

Se estableció el problema a solucionar en el contexto de optimización. El problema estuvo relacionada variabilidad de los atributos de calidad de la miel.

Paso 2. Definición de objetivos:

Como se mencionó en el capítulo 2, se estableció el objetivo en función a la toma de decisiones para solucionar el problema planteado. Aquí se tomó la mejor decisión para mejorar la calidad de la miel disminuyendo la incertidumbre de los atributos de calidad sensorial de la miel.

Paso 3. Identificación de variables de decisión:

Las variables operacionales independientes de decisión (pH y °Brix) estuvieron relacionadas con los parámetros que afecten negativamente a los atributos de calidad (viscosidad, sabor y presencia de cristales) según el modelo planteado por Quezada Moreno y col. (2016) y a la formulación del problema.

Paso 4. Formulación de la función objetivo:

La optimización estuvo relacionada con el cumplimiento o no de la función objetivo. Se elaboró en dependencia de las variables y el problema lo que se pretenda optimizar, en este caso se enfocó en dependencia del carácter de las variables.

Paso 5. Establecer restricciones:

En este apartado se analizó si la función objetivo necesita posibles restricciones para cumplir con la optimización. Establecer límites de medida que afecten o impidan cumplir la función objetivo. Las restricciones siempre estuvieron relacionadas con el problema e hipótesis de la investigación.

Paso 6. Análisis de la información:

Previo al análisis se tuvo información de parámetros de criterios de calidad, condiciones de °Brix y pH bibliográficos de los atributos de calidad de la miel, para realizar el análisis de los resultados simulados y seleccionar en función a la distribución probabilística que se establezca de la mejor o mejores alternativas que cumplan con la función objetivo.

Paso 7. Validación del modelo matemático para la optimización:

Se validó el modelo matemático para la optimización mediante la verificación de todos los resultados obtenidos en las tres etapas: modelación matemática, simulación y optimización, con los de referencia bibliográfica, para la adecuada y veraz comparación de los resultados obtenidos y que estos cumplan con la hipótesis, se relaciona con el análisis de la incertidumbre (Brito Vallina y col., 2011).

3.4.4. Análisis de la incertidumbre

Se realizó las simulaciones de los modelos matemáticos en condiciones diferentes de materia prima y procesos, el análisis de cómo influyen de forma positiva o negativa los parámetros en la obtención de la miel, con criterios de calidad y rendimiento del producto. Se generaron variables aleatorias de las condiciones y se empleó la distribución Beta por su aplicabilidad en el criterio de alta fiabilidad a analizar (Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones de la materia prima y operacionales del proceso para cada estudio de caso

Caso	Materia prima	Condiciones de operación	Condiciones de operación/ calidad	Simulaciones	Lotes/ día
Primer caso	Fijo °Brix 18 pH 4,78	Fijo Evaporador No.1 35 °Brix evaporador No.2 60 °Brix	Aleatorio evaporador No.3 °Brix 74-78 pH 3,5-4,5	12	10

Segundo caso	Aleatorio °Brix 13-18 pH entre 3,5-5,00	Fijo evaporador No.1 35 °Brix evaporador No.2 60 °Brix	Aleatorio Evaporador No.3 °Brix de 74 a 78 pH 3,5-4,5	12	10
Tercer caso	Aleatorio °Brix 13-18 pH 3,5-5,00	Aleatorio evaporador No.1 35-40 °Brix evaporador No.2 55-60 °Brix	Aleatorio evaporador No.3 °Brix de 74 a 78 pH 3,5-4,5	12	10
Referencia	(Quezada y Moreno col., 2016)	(Quezada y Moreno col., 2015)	(Quezada y col., 2018)		

Fuente: Elaboración propia

En los tres casos de estudio el intervalo de pH en el evaporador No.3 de la tecnología de la miel es de 3,5 a 4,5, teniendo en consideración que estos valores permanecen fijos y aleatorios de acuerdo de la metodología planteada. La temperatura en la clarificación es de 85 °C. Por su parte, la temperatura en la evaporador 1, 2 y 3 es de 98 °C, 101 °C y 103 °C, respectivamente. El dimensionamiento de equipos estará en relación con el volumen de producción diaria, mensual y anual de cada caso.

Las simulaciones se realizaron de acuerdo a las condiciones de la materia prima y operacional del proceso para cada estudio de caso (Tabla 1). En el primer estudio de caso, se establecieron los valores fijos para las condiciones de materia prima (°Brix y pH) y las condiciones de operación en el proceso de elaboración de miel (calentamiento, evaporación 1, evaporación 2). Para el evaporador 3 las condiciones de operación fueron aleatorias a partir de los valores generados de pH y °Brix. Los resultados del evaporador 3 define la calidad del producto. Cada estudio de caso tiene una producción de 10 lotes, se asumió que los 10 lotes es la producción de un día.

En el segundo estudio de caso, las condiciones de la materia prima y del producto final fueron aleatorios. Las condiciones de operación se mantuvieron fijas para el evaporador 1 y 2. La

producción es de 10 lotes al día, 120 lotes al mes y 1560 lotes al año. El tercer estudio de caso las condiciones de la materia prima, el producto final y las condiciones de operación fueron aleatorias, con el propósito de determinar cómo influyen las condiciones de operación y materia prima en la calidad de la miel.

3.5. ESTRATEGIAS PARA LA BÚSQUEDA DE LAS MEJORES CONDICIONES ÓPTIMAS DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE MIEL DE CAÑA DE AZÚCAR

Para la selección de las mejores simulaciones de todos los estudios de caso se tuvo en cuenta que todas cumplieran la condición del valor del nivel sigma fuese mayor de tres. En todos los casos se aplicaron las siguientes estrategias (Figura 2):

Estrategia 1:

Objetivo: Comparar los resultados de la aplicación de los métodos de optimización aplicados (reducción de la incertidumbre en el rango, optimización de la calidad, optimización del VAN)

Estrategia 2:

Objetivo: Buscar las mejores condiciones de operación para cada una de las producciones aleatorias (10, 120 y 1560 lotes aleatorios).

Estrategia 3:

Objetivo: Seleccionar las mejores condiciones de operación en cada estudio de caso, atendiendo al VAN.

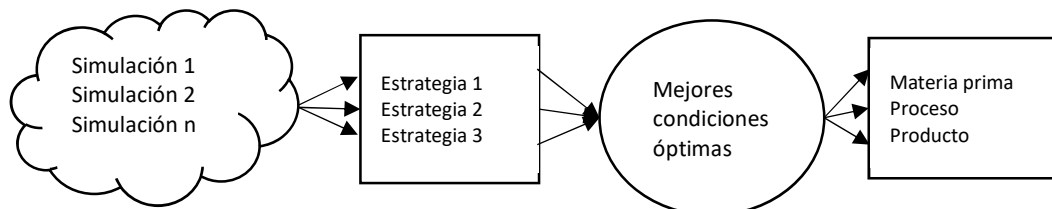


Figura 2. Estrategias para la búsqueda de la mejor condición óptima del proceso de producción de miel.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS

4.1. MODELOS MATEMÁTICOS DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE MIEL

4.1.1. Identificación de los fenómenos que se desarrollan en el proceso de obtención de miel

Los fenómenos que ocurren en la tecnología de elaboración de la miel de caña de azúcar se pueden identificar a través de las operaciones involucradas (Figura 3). Una vez cosechada la materia prima, la tecnología del proceso empieza con la molienda, donde se extrae el jugo de caña y se separa de la fibra (bagazo) que es eliminada, el jugo es sedimentado en un tanque que separa los lodos, posteriormente se clarifica el jugo con mucílago y el jugo clarificado es sometido a tres evaporaciones sucesivas alcanzando entre 74-78 °Brix (Quezada Moreno y col., 2016).

Por tanto, la tecnología del proceso de obtención de miel que se ha seleccionado para esta investigación, involucra los siguientes fenómenos (Figura 3): 1) reducción de tamaño y separación de sólidos (molienda y sedimentación); 2) transferencia de calor (calentamiento y evaporación). Los modelos matemáticos que se establecen en la investigación están en correspondencia a estos dos tipos de fenómenos.

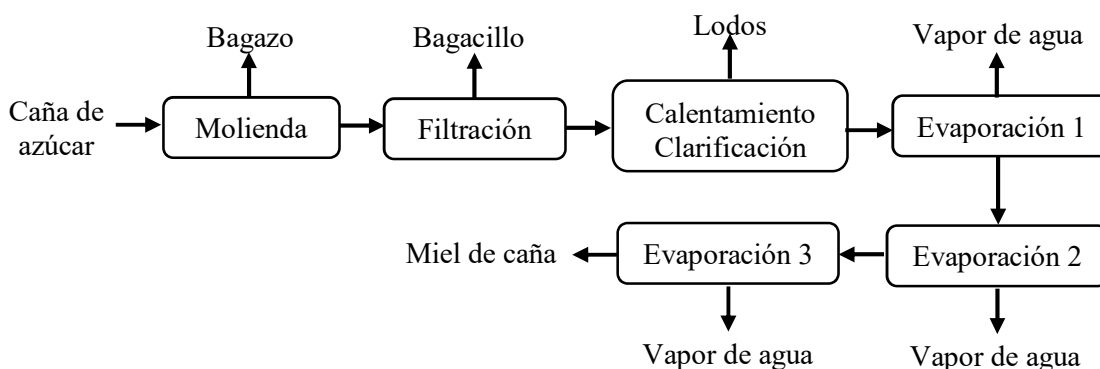


Figura 3. Tecnología del proceso de obtención de miel.

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Desarrollo de modelos

Los modelos matemáticos fundamentales que se obtuvieron se han agrupado en la Tabla 2. Son un conjunto de 31 ecuaciones algebraicas lineales y no lineales correspondientes a los fenómenos presentes en la tecnología de la obtención de miel. Se han agrupado según las transformaciones que ocurren en el proceso. Se obtuvo también un conjunto de ecuaciones particulares para cada una de estas operaciones, que se derivan de estas fundamentales y que desde el punto de vista del proceso corresponden al análisis de los componentes involucrados (por ejemplo, contenido de agua, de fibra, etc.). Este tipo de ecuaciones sumaron más de 300 por lo que no se muestran en el trabajo y están en los *scripts* utilizados en el simulador *Octave* (base de datos suplementaria).

Tabla 2. Modelos matemáticos de balance masa y energía y dimensionamiento de los equipos para cada una de las operaciones de obtención de miel de caña.

Operaciones tecnológicas	Tipo de Balance	Modelos matemáticos	Numeración
Molienda	B. de masa	$JCSMol = FCE * Ef$	Ecuación 1
		$Bag = FCE - JCSMol$	Ecuación 2
Filtrado	B. de masa	$JCSMol = Bagc + JCSFiltr$	Ecuación 3
Calentamiento	B. de masa	$JCSFiltr = JCSCalent$	Ecuación 4
	B. de energía	$CpJCCalent = 4,1868 - 0,02512 * BrixJCSFiltr$	Ecuación 5
		$FlujJCCalent = \frac{JCSCalent}{tiempCalent}$	Ecuación 6
		$Qced = \frac{QgCalent}{PerdTCCalent}$	Ecuación 7
		$QgCalent = FlujJCCalent * CpJCCalen * (TempJCSCalent - TempJCSFiltr)$	Ecuación 8
		$deltaTCalent = TSupCalent - TempJCSCalent$	Ecuación 9
	Parámetro de diseño	$AreaCalent = \frac{QgCalent}{CoefGlobalTCCalent * deltaTCale}$	Ecuación 10

Evaporación 1	B. de masa	$JCSCalent = VapSEvap1 + JCSEvap1$	Ecuación 11
	B. de energía	$CpJCEvap1 = 4,1868 - 0,02512 * BrixJCSCalent$	Ecuación 12
		$FlujJCEvap1 = \frac{JCSEvap1}{tiempEvap1}$	Ecuación 13
		$Qced = \frac{QgEvap1}{PerdTCEvap1}$	Ecuación 14
		$QgEvap1 = FlujJCEvap1 * CpJCEvap1 * (TempJCEvap1 - TempJCSCalent)$	Ecuación 15
		$deltaTEvap1 = TSupEvap1 - TempJCEvap1$	Ecuación 16
	Parámetro de diseño	$AreaEvap1 = \frac{QgEvap1}{CoefGlobalTCEvap1 * deltaTEvap1}$	Ecuación 17
Evaporación 2	B. de masa	$JCSEvap1 = VapSEvap2 + JCSEvap2$	Ecuación 18
	B. de energía	$CpJCEvap2 = 4,1868 - 0,02512 * BrixJCSEvap1$	Ecuación 19
		$FlujJCEvap2 = \frac{JCSEvap2}{tiempEvap2}$	Ecuación 20
		$Qced = \frac{QgEvap2}{PerdTCEvap2}$	Ecuación 21
		$QgEvap2 = FlujJCEvap2 * CpJCEvap2 * (TempJCEvap2 - TempJCSEvap1)$	Ecuación 22
		$deltaTEvap2 = TSupEvap2 - TempJCEvap2$	Ecuación 23
	Parámetro de diseño	$AreaEvap2 = \frac{QgEvap2}{CoefGlobalTCEvap2 * deltaTEvap2}$	Ecuación 24

Evaporación 3	Balance de masa	$JCSEvap2 = VapSEvap3 + JCSEvap3$	Ecuación 25
	Balance de energía	$CpJCEvap3 = 4,1868 - 0,02512 * BrixJCSEvap2$	Ecuación 26
		$FlujJCEvap3 = \frac{JCSEvap3}{tiempEvap3}$	Ecuación 27
		$Qced = \frac{QgEvap3}{PerdTCEvap3}$	Ecuación 28
		$QgEvap3 = FlujJCEvap3 * CpJCEvap3 * (TempJCSEvap3 - TempJCSEvap2)$	Ecuación 29
		$deltaTEvap3 = TSupEvap3 - TempJCSEvap3$	Ecuación 30
	Parámetro de diseño	$AreaEvap3 = \frac{QgEvap3}{CoefGlobalTCEvap3 * deltaTEvap3}$	Ecuación 31

Fuente: Elaboración propia

Los indicadores ambientales para el proceso de la obtención del producto final se modelaron siguiendo las ecuaciones 32-36 (Tabla3).

Tabla 3. Modelos matemáticos en el cálculo de indicadores ambientales

Indicadores Ambientales	Modelo	Numeración
Consumo de materia prima	$ConsMP = \frac{FCE}{JCSEvap3}$	Ecuación 32
	$ConsJC = \frac{JcSFiltr}{JCSEvap3}$	Ecuación 33
Consumo de energía	$ConEnerg = \frac{QcedCalent + QcedEvap1 + QcedEvap2 + QcedEvap3}{JCSEvap3}$	Ecuación 34
Vertimiento de residuos solidos	$VRS = \frac{Bag + BagcS}{JCSEvap3}$	Ecuación 35

Vertimiento de residuos gaseosos	$ResG = \frac{VPrEvap1 + VPrEvap2 + VPrEvap3}{JCSEvap3}$	Ecuación 36
----------------------------------	--	-------------

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4, indica las ecuaciones 37-39 de los modelos matemáticos que permitieron determinar el comportamiento de los atributos de calidad: presencia de cristales, sabor y viscosidad de la miel de caña de azúcar, las ecuaciones de guía fueron planteadas por Quezada Moreno y col. (2016).

Tabla 4. Modelos matemáticos para los atributos de calidad de la miel

Atributos de calidad	Modelos matemáticos	Numeración
Viscosidad	$V = -10806,86 - 37,56 \cdot X_1 + 0,33 \cdot X_1^2 + 287,14 \cdot X_2 - 1,90 \cdot X_2^2 + 0,45 \cdot X_1 \cdot X_2$	Ecuación 37
Sabor	$S = 144,68 + 115,69 \cdot X_1 - 13,13 \cdot X_1^2 - 9,98 \cdot X_2 + 0,06 \cdot X_2^2 - 0,04 \cdot X_1 \cdot X_2$	Ecuación 38
Presencia de cristales	$C = -4092,39 + 22,46 \cdot X_1 - 3,79 \cdot X_1^2 + 108,38 \cdot X_2 + -0,72 \cdot X_2^2 - 0,07 \cdot X_1 \cdot X_2$	Ecuación 39

Fuente: Elaboración propia

X_1 : pH; X_2 : °Brix

El nivel sigma en el proceso de obtención de miel se determinó, a partir de la ecuación 40 y planteadas por Abdelhamid (2003), para los lotes defectuosos por millón de oportunidades (DPMO) se utilizó la ecuación 41 planteada por Keller (2011) como indica la Tabla 5.

Tabla 5. Modelos matemáticos para el cálculo del nivel sigma y los DPMO

Modelo matemático	Numeración
$Z = Z_{DPU} + 1,5$	Ecuación 40
$DPMO = \frac{DPU}{Oportunidades} * 1\ 000\ 000$	Ecuación 41

Fuente: Elaboración propia

Defectos por unidades (DPU)

Para lograr la optimización del rango, calidad y valor actual neto (VAN) se utilizaron las ecuaciones de la Tabla 6, para cada uno de los estudios de caso, cada aspecto a optimizar tuvo restricciones. El rango óptimo, las ecuaciones 42-47 comprenden las dos variables

independientes de pH y °Brix, cada una con sus ecuaciones del límite superior (ecuación 42, 44) e inferior (ecuación 43, 45) respectivamente para disminuir la incertidumbre. La calidad óptima, la ecuación 48 dependen de los atributos calidad: viscosidad, presencia de cristales y sabor, cada atributo tiene sus límites que se convierten en restricciones (ecuación 49-53). El VAN óptimo se indica en la ecuación 54, con su restricción que sea mayor a “0” (ecuación 55).

Al cumplir con los tres aspectos de optimización se podrá decir que se ha logrado la optimizar la calidad de la miel de caña de azúcar, sin afectar la rentabilidad de producción. Las ecuaciones se aplican a los tres casos de estudios, que varían las condiciones de fijas o aleatorias.

Tabla 6. Modelos matemáticos y restricciones para optimizar: rango, calidad y VAN en todos los casos de estudio

Optimización	Modelos matemáticos	Numeración
Rango	$pH_{lsu} = mediapH + (desvpH * 1)$	Ecuación 42
	$pH_{lsi} = mediapH - (desvpH * 1)$	Ecuación 43
	$brix_{lsu} = mediabrix + (desvbrix * 1)$	Ecuación 44
	$brix_{lsi} = mediabrix - (desvbrix * 1)$	Ecuación 45
	$pH = 3.5 > [pH] < 4.5$	Ecuación 46
	$°Brix = 74 > [pH] < 78$	Ecuación 47
Calidad	$Calidad = ((V - 10)^2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) + (C - 10)^2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right) + (S - 10)^2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right))$	Ecuación 48
	$nivel\ sigma = > 3$	Ecuación 49
	$°Brix = 74 > [°Brix] < 78$	Ecuación 50
	$Sabor = 6 > [sabor] < 10$	Ecuación 51
	$viscosidad = 6 > [visc] < 10$	Ecuación 52
	$presencia\ de\ cristales = 6 > [cris] < 10$	Ecuación 53
VAN	$VAN = npv(0.35, a, EgNeg1)$	Ecuación 54
	$VAN > 0$	Ecuación 55

Fuente: Elaboración propia

4.2. Simulación del proceso de producción de miel de caña

Previo al desarrollo de la simulación para lograr disminuir la variación de los atributos de calidad de la miel se establecieron límites de aplicación en las principales variables como: °Brix, pH, temperatura y dimensionamiento de los equipos. La simulación se realizó en el *software Octave* y se determinó: los valores óptimos dentro de un intervalo, los mejores valores de las variables independientes de pH y °Brix que mejoró las variables dependientes de los atributos de calidad de la miel, y disminuyó la variación de las variables y los productos defectuosos en cada lote de producción.

En la primera interacción no se alcanzó el nivel sigma mayor a 3, automáticamente se generó una nueva interacción hasta que se obtuvo el nivel sigma deseado y se repitió este proceso hasta obtener las simulaciones de los lotes por cada estudio de caso. En los casos de estudios se obtuvieron resultados del intervalo de las variables °Brix y pH en la salida del evaporador 3, cantidad de miel, donde se evidencia cómo influyen los °Brix en las áreas de intercambio de calor y la reducción de productos defectuosos en cada interacción con base en los límites de aplicación, permitió optimizar tres aristas: rango, calidad y VAN. Para la optimización del VAN se realizó el análisis económico.

La interpretación de los datos se realizó a través de gráficas en el *software OriginLab*, y se analizó cómo influyen las variables dependientes en el eje z, con respecto a los valores de pH y sólidos solubles (°Brix) del producto. Las variables independientes: defectuosos por millón de oportunidades (DPMO), nivel sigma, área de transferencia de calor en la salida del evaporador 3, valor actual neto (VAN), y variables dependientes los atributos de calidad tales, como viscosidad, presencia de cristales y sabor.

4.2.1. Primer estudio de caso

En el primer estudio de caso se obtuvo resultados de los intervalos de las variables °Brix y pH en la salida del evaporador 3, cantidad de miel, donde se evidencia cómo influye los °Brix en las áreas de intercambio de calor y la reducción de productos defectuosos en cada interacción con base en los límites de aplicación, permitió optimizar tres aristas: rango, calidad y VAN.

Los atributos de calidad, viscosidad, presencia de cristales y sabor de las producciones de 10, 120 y 1560 lotes. En la producción 10, en el óptimo-rango la tercera simulación, tuvo

viscosidad de 6,36, la presencia de cristales fue de 10,04, y el sabor de 6,66. En el óptimo-calidad la viscosidad es 9,13, presencia de cristales de 9,16, sabor de 9,12. En el óptimo-VAN la doceava simulación tuvo viscosidad de 9,08, presencia de cristales de 9,13, sabor de 9,19. En la producción 120, la cuarta simulación en el óptimo-rango tuvo viscosidad de 6,77, presencia de cristales de 10,08, sabor de 8,40. En el óptimo-calidad la viscosidad fue de 9,13, presencia de cristales de 9,16, sabor de 9,12. En el óptimo-VAN la doceava simulación tuvo viscosidad de 8,98, presencia de cristales de 9,23, sabor de 9,18. En la producción 1560, la séptima en el óptimo-rango tuvo viscosidad de 6,59, presencia de cristales de 10,05, sabor de 8,77. En el óptimo-calidad con viscosidad de 8,98, presencia de cristales de 9,23, sabor de 9,18. En el óptimo-VAN la onceava simulación tuvo viscosidad de 8,88 presencia de cristales de 9,28, sabor de 9,20 (Anexo 2).

Los atributos de calidad según Quezada Moreno y col. (2016) la combinación adecuada de pH y concentración de sólidos solubles (°Brix), disminuye la formación de cristales y da mayor estabilidad. Los valores de los atributos están en una escala hedónica entre 0 y 10, la presencia de valores altos significan que son productos de más aceptación y valores bajos son más productos rechazados. Mayor contenido de °Brix y pH regulado mejoran los atributos. Los datos obtenidos en la producción 10, en el óptimo-VAN fue la tercera simulación, tuvo viscosidad de 9,08, presencia de cristales de 9,13, sabor de 9,19 (Anexo 2), posee menor viscosidad por el contenido de sólidos solubles de materia prima menor y por los intervalos de pH 3,76-3,80, °Brix 74,85-75,01. Los valores de pH caña y producto, °Brix caña y producto establecidos en la metodología están dentro de los intervalos de pH 3,5-4,5, °Brix caña 16-21°Brix, °Brix producto de 74 °Brix-78 °Brix (Quezada y col., 2018).

En el análisis del comportamiento del valor actual neto en cada producción, en la producción 10 en la tercera simulación en el óptimo-rango, tuvo intervalos de pH 3,76-3,80, °Brix 74,56-74,79 y VAN 306 809,21 USD. En el óptimo-calidad, los intervalos fueron de pH 3,5-4,5 y °Brix 74-78 con VAN 303 580,95 USD. En el óptimo-VAN la doceava simulación tuvo intervalos de pH 3,73-4,27, °Brix 75,31-77,34, y VAN 326 577,84 USD. En la producción 120, en el óptimo-rango la cuarta, tuvo intervalos de pH 3,77-3,84, °Brix 74,92-75,22, y VAN 259 376,33 USD. En el óptimo-calidad los intervalos son de pH 3,5-4,5 y °Brix 74-78 y VAN 257 522,40 USD. En el óptimo-VAN la doceava tuvo intervalos de pH 3,61-4,14, °Brix 74,60-76,82, y valor actual neto 259 098,39 USD. En la producción 1560, en el óptimo-rango la séptima tuvo intervalos de pH 3,76-3,80, °Brix 75,05-75 y VAN 255 208,53 USD.

En el óptimo-calidad los intervalos fueron de pH 3,5-4,5 y °Brix 74-78 con VAN 253 657,34 USD. En el óptimo-VAN la onceava tuvo VAN de 253 013,04 USD con intervalos de pH 3,63-4,15, °Brix 74,59-76,68 (Figura 4).

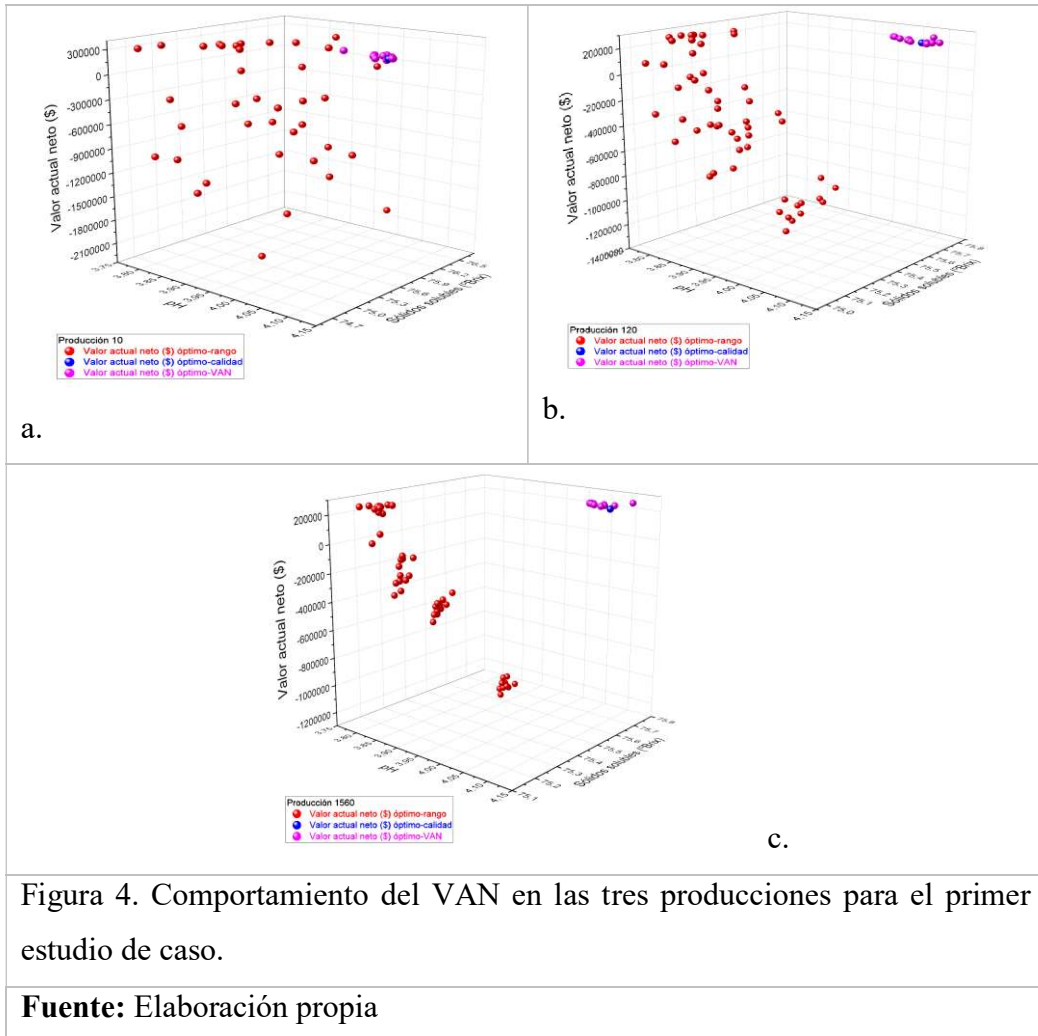


Figura 4. Comportamiento del VAN en las tres producciones para el primer estudio de caso.

Fuente: Elaboración propia

Según Mete (2014) el análisis económico brinda criterios de evaluación y selección de alternativas de inversión, si el valor del VAN es mayor o igual a cero se acepta, por lo tanto el valor debe ser positivo. Resultados similares se obtuvieron en la producción 10, el mejor valor fue en el óptimo-VAN la doceava simulación, con DPMO “0” (Anexo 3), tuvo intervalos de pH 3,73-4,27, °Brix 75,31-77,34 y VAN de 326 577,84 USD, pH producto de 4,10, °Brix producto de 75,68, viscosidad de 9,08, presencia de cristales de 9,13, sabor de 9,19 (Anexo 2) y área de transferencia de calor de 1,006 m² (Anexo 4). Según Quezada y col. (2018) el rendimiento del producto final depende de la concentración de las variables iniciales, y la productividad está en función al tiempo, a menor consumo de materia prima, jugo de caña y energía hay menor costo, estos resultados experimentales coinciden con la optimización para la producción de 10 lotes aleatorios.

La estrategia de selección de las mejores simulaciones del primer estudio de caso, se indica en la Tabla 7, para cada optimización.

Tabla 7. Selección de las mejores simulaciones del primer estudio de caso

Estrategia de optimización	Prod. *	Sim. **	Parámetros de diseño y de operaciones			Nivel sigma	Atributos de calidad			VAN (USD)
			Á***.E vap3 (m ²)	°Brix Evap3	pH Evap3		Visc. ****	P.cris *****	S. **** **	
óptimo-rango	10	3	0,954	74,56-74,79	3,76-3,80	6	6,36	10,04	6,66	306 809,21
	120	4	0,9754	74,92-75,22	3,77-3,84	6	6,77	10,08	8,40	259 376,33
	1560	7	0,979	75,08-75,24	3,76-3,80	6	6,59	10,05	8,77	255 208,53
óptimo-calidad	10	todas	1,003	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	303 580,95
	120	todas	1,003	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	257 522,40
	1560	todas	1,003	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	253 657,34
óptimo-VAN	10	12	1,006	75,68	4,10	6	9,08	9,13	9,19	326 577,84
	120	12	1,004	75,65	4,08	6	8,98	9,23	9,18	259 098,39
	1560	11	1,005	75,65	4,06	6	8,88	9,28	9,20	253 013,04

(*: Lotes aleatorios al año), (**: Número de la simulación), (***: Área del Evaporador 3), Producción (Prod.*), simulación (Sim. **), Área de transferencia de calor en el evaporador 3 (Á***.Evap3), (****: viscosidad), (*****: Presencia de cristales) (*****: sabor) **Fuente:** Elaboración propia

4.2.2. Segundo estudio de caso

De las tres producciones las óptimas se seleccionaron de cada una de las tres optimizaciones de rango, calidad y valor actual neto, en valores aleatorios de materia prima, valores fijos en condiciones de operación de proceso y aleatorios en condiciones de operación de calidad.

Los atributos de calidad, viscosidad, presencia de cristales y sabor de las producciones de 10, 120 y 1560 lotes. En la producción 10, en el óptimo-rango la sexta simulación tuvo viscosidad de 6,19, presencia de cristales de 10,09, sabor de 8,68. En el óptimo-calidad la octava simulación tuvo viscosidad es 9,13, presencia de cristales de 9,16, sabor de 9,12. En

el óptimo-VAN la octava simulación tuvo viscosidad de 9,21, presencia de cristales de 9,07, sabor de 9,11. En la producción 120, en el óptimo-rango la sexta simulación tuvo viscosidad de 6,56, presencia de cristales de 10,05, sabor de 8,76. En el óptimo-calidad la quinta simulación tuvo viscosidad es de 9,13, presencia de cristales de 9,16, sabor de 9,12. En el óptimo-VAN la tercera simulación tuvo viscosidad de 9,11, presencia de cristales de 9,17, sabor de 9,13. En la producción 1560, en el óptimo-rango la primera simulación tuvo viscosidad de 6,78, presencia de cristales de 10,04, sabor de 8,69. En el óptimo-calidad la doceava simulación tuvo viscosidad es de 9,13, presencia de cristales de 9,16, sabor de 9,12. En el óptimo-VAN la sexta simulación tuvo viscosidad de 9,05, presencia de cristales 9,18, sabor 9,17 (Anexo 5).

Los resultados obtenidos en este estudio de caso fueron similares al primero en cuanto al número de lotes aleatorios simulados. En la producción 10, en el óptimo-VAN la sexta simulación tuvo viscosidad de 9,05, presencia de cristales de 9,18, sabor de 9,17. La concentración de sólidos solubles de la miel está dentro de lo mencionado por Quezada Moreno y col. (2016) de 74°Brix. Los valores de los °Brix de caña y producto dentro de la metodología utilizada cumplen con lo señalado por Quezada Moreno y col. (2015).

En las tres capacidades los valores de DPMO fueron “0” (Anexo 6), en la producción de 10, del óptimo-rango fue la sexta, con VAN de 297 575,51 USD. En la óptima-calidad, la octava simulación con VAN 301 543,90 USD. En el óptimo-VAN la octava simulación con 319 824,72 USD. En la producción de 120 lotes al mes, en el óptimo-rango fue la sexta simulación, con un VAN de 256 074,97 USD. En la óptima-calidad fue la quinta con el VAN de 245 526,40 USD. En el óptimo-VAN la tercera simulación fue de 242 678,48 USD. En la producción de 1560, el óptimo-rango fue la primera simulación, con un VAN de 218 419,39 USD. En la óptima-calidad fue la doceava simulación con VAN de 229 849,03 USD, en el óptimo-VAN la sexta simulación con VAN de 247 961,17 USD (Figura 5).

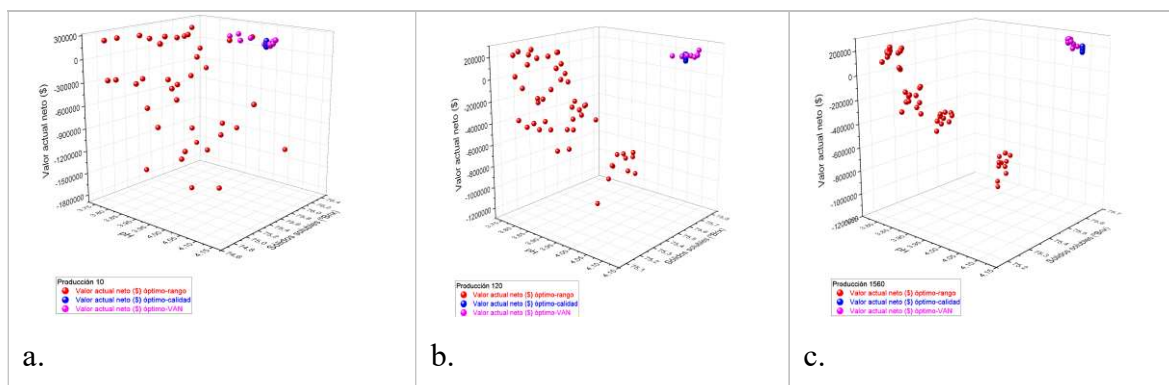


Figura 5. Comportamiento del VAN en las tres producciones para el segundo estudio de caso.

Fuente: Elaboración propia

Según Mete (2014) el análisis económico brinda criterios de evaluación y selección de alternativas de inversión, si el valor del VAN es mayor o igual a cero se acepta, por lo tanto, el valor del valor actual neto debe ser positivo. En la producción 10, en el óptimo-VAN la octava simulación con 319 824,72 USD, DPMO “0” (Anexo 6), área de transferencia de calor en el evaporador 3 0,964 m² (Anexo 7), tuvo intervalos de pH 3,66-4,31, °Brix 75,26-77,38, pH producto de 4,13, pH caña de 3,74, pH producto de 4,02, °Brix caña de 17,48, °Brix producto de 75,62, viscosidad de 9,21, presencia de cristales de 9,07 y sabor de 9,11. El rendimiento del producto final depende de la concentración de las variables iniciales, y la productividad está en función al tiempo, menores costos de acuerdo al menor consumo de materia prima, jugo de caña y energía (Quezada y col., 2018).

La estrategia de selección de las mejores simulaciones del primer estudio de caso, se indica en la Tabla 8, para cada optimización.

Tabla 8. Selección de las mejores simulaciones del segundo estudio de caso

Estrategia de optimización	Prod. *	Si m. **	Parámetros de diseño y de operaciones			Nivel sigma	Atributos de calidad			VAN (USD)
			Á***.Evap 3 (m ²)	°Brix Evap3	pH Evap 3		Visc. ****	P. cris. *****	S. ***	
óptimo-rango	10	6	0,943	75,00-75,28	3,78-3,98	6	6,36	10,09	8,68	297 575,51
	120	6	0,958	75,05-75,20	3,76-3,80	6	6,56	10,05	8,76	256 074,97

	1560	1	0,836	75,16-	3,77-	6	6,78	10,04	8,69	218 419,39
				75,31	3,81					
óptimo-	10	8	0,986	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	301 543,90
calidad	120	5	0,948	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	245 526,40
	1560	12	0,901	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	229 849,03
óptimo-VAN	10	8	0,964	75,62	4,13	6	9,21	9,07	9,11	319 824,72
	120	3	0,925	75,62	4,11	6	9,11	9,17	9,13	242 678,48
	1560	6	0,980	75,66	4,05	6	9,05	9,18	9,17	247 961,17

(*: Lotes aleatorios al año), (**: Número de la simulación), (***: Área del Evaporador 3), Producción (Prod.*), simulación (Sim. **), Área de transferencia de calor en el evaporador 3 (Á***.Evap3), (****: viscosidad), (*****: Presencia de cristales) (*****: sabor) **Fuente:** Elaboración propia

4.2.3. Tercer estudio de caso

En el tercer caso en las tres producciones las óptimas simulaciones se seleccionaron de cada una de las tres optimizaciones rango, calidad y valor actual neto, en valores aleatorios de materia prima, valores aleatorios en condiciones de operación de proceso y aleatorios en condiciones de operación de calidad.

Los atributos de calidad, viscosidad, presencia de cristales y sabor de las producciones de 10, 120 y 1560. En la producción 10, en el óptimo-rango la octava simulación tuvo viscosidad de 7,07, presencia de cristales de 9,78, sabor de 9,32. En el óptimo-calidad la octava simulación tuvo viscosidad es de 9,13, presencia de cristales de 9,16, sabor de 9,12. En el óptimo-VAN la doceava simulación tuvo viscosidad de 9,22, presencia de cristales de 8,96, sabor de 9,20. En la producción 120, en el óptimo-rango la segunda simulación tuvo viscosidad de 6,19, presencia de cristales de 10,12, sabor de 8,34. En el óptimo-calidad la primera simulación tuvo viscosidad es de 9,13, presencia de cristales de 9,16, sabor de 9,12. En el óptimo-VAN la primera simulación tuvo viscosidad de 9,88, presencia de cristales de 9,24, sabor de 9,23. En la producción 1560, en el óptimo-rango la cuarta simulación tuvo viscosidad de 6,40, presencia de cristales de 10,00, sabor de 9,03. En el óptimo-calidad la quinta simulación tuvo viscosidad es de 9,13, presencia de cristales de 9,16, sabor de 9,12. En el óptimo-VAN la tercera simulación tuvo viscosidad de 8,93, presencia de cristales de 9,20, sabor de 9,19 (Anexo 8).

Los atributos de calidad según Quezada Moreno y col. (2016) la combinación adecuada de pH y concentración de sólidos solubles, genera una adecuada estabilidad, disminuyendo la formación de cristales, los valores están entre una escala hedónica de 0 a 10 para cada atributo de calidad, en presencia de valores altos significa que son productos de más aceptación y valores bajo son menos productos aceptados. Mayor contenido de °Brix y pH regulado mejoran los atributos. En la producción 10, en el óptimo-calidad la octava tuvo viscosidad es 9,13, presencia de cristales 9,16, sabor 9,12 (Anexo 8).

En la producción de 10 lotes al día, del óptimo-rango fue la octava simulación, con VAN de 298 601,62 USD. En la óptima calidad, la octava simulación con VAN 301 316,87 USD. En el óptimo-VAN la doceava simulación con 291 377,54 USD. En la producción de 120 lotes al mes, en el óptimo-rango fue la segunda, con un VAN de 258 141,57 USD. En la óptima-calidad fue la primera simulación con el VAN de 253 038,30 USD. En el óptimo-VAN la primera simulación fue de 251 097,14 USD. En la producción de 1560 lotes al año, el óptimo-rango fue la cuarta simulación, con un VAN de 250 311,94 USD. En la óptima-calidad fue la quinta simulación con VAN de 250 490,18 USD. En el óptimo-VAN la tercera simulación con valor actual neto de 246 020,29 USD (Figura 6).

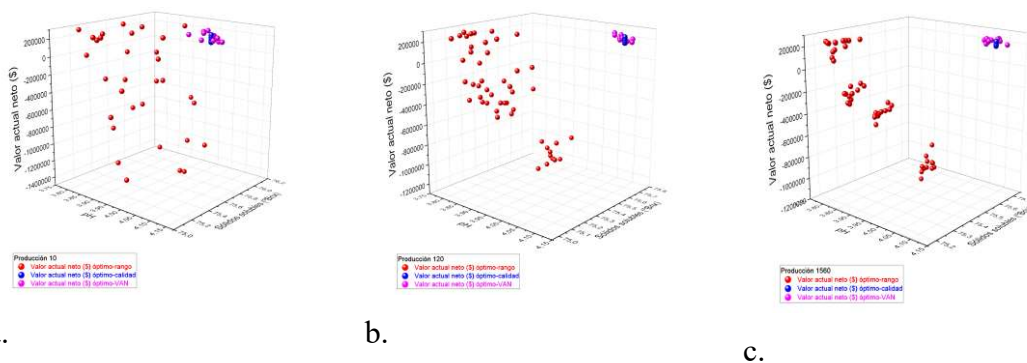


Figura 6. Comportamiento del VAN en las tres producciones para el tercer estudio de caso.

Fuente: Elaboración propia

Mete (2014) Menciona que el análisis económico brinda criterios de evaluación y selección de alternativas de inversión, si el valor del VAN es mayor o igual a cero se acepta, por lo tanto, el valor del valor actual neto debe ser positivo. En la producción 10, en la óptima-calidad, la octava con VAN 301 316,87 USD, DPMO “0” (Anexo 9), con intervalos de pH 3,5-4,5, °Brix 74-78, área de 1,16m² (Anexo 10). Quezada y col. (2018) Consideran que el rendimiento del producto final depende de la concentración de las variables iniciales, y la

productividad está en función al tiempo, menores costos de acuerdo al menor consumo de materia prima, jugo de caña y energía.

La estrategia de selección de las mejores simulaciones del primer estudio de caso, se indica en la Tabla 9, para cada optimización.

Tabla 9. Selección de las mejores simulaciones del tercer estudio de caso

Estrategia de optimización	Prod. *	Sim. **	Parámetros de diseño y de operaciones			Nivel sigma	Atributos de calidad			VAN (USD)
			Á***.Eva p3 (m ²)	°Brix Evap3	pH Evap 3		Visc. ****	P. cris. *****	S. **	
óptimo-rango	10	8	1,383	75,46-75,65	3,79-3,85	6	7,07	9,78	9,32	298 601,62
	120	2	1,226	75,07-75,25	3,76-3,80	6	6,19	10,12	8,34	258 141,57
	1560	4	1,097	75,12-75,27	3,77-3,81	6	6,40	10,00	9,03	250 311,94
óptimo-calidad	10	8	1,163	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	301 316,87
	120	1	1,059	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	253 038,30
	1560	5	1,239	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	250 490,18
óptimo-VAN	10	12	1,301	75,67	4,07	6	9,22	8,96	9,20	291 377,54
	120	1	0,996	75,69	4,06	6	9,88	9,24	9,23	251 097,14
	1560	3	1,301	75,64	4,07	6	8,93	9,26	9,19	246 020,29

(*: Lotes aleatorios al año), (**: Número de la simulación), (***: Área del Evaporador 3), Producción (Prod.*), simulación (Sim. **), Área de transferencia de calor en el evaporador 3 (Á***.Evap3), (****: viscosidad), (*****: Presencia de cristales) (*****: sabor) **Fuente:** Elaboración propia

4.3. Selección de las mejores simulaciones de los tres estudios de caso, se aplicó las siguientes estrategias:

A partir de las Tablas 7, 8 y 9 se seleccionaron las mejores simulaciones de cada producción 10, 120 y 1560 lotes en cada estudio de caso, con criterio de optimización del rango, calidad y valor actual neto obtenidos (Tabla 10).

Tabla 10. Selección de las mejores simulaciones de los tres estudio de caso

Estudio de caso	Pro d.*	Estrategia de optimización	Si m.**	Parámetros de diseño y de operaciones			Nivel sigma	Atributos de calidad			VAN (USD)
				Á***.Eva p3 (m ²)	°Brix Evap3	pH Evap3		Visc.****	P. cris.*****	S.*****	
Primer	10	óptimo-VAN	12	1,006	75,68	4,10	6	9,08	9,13	9,19	326 577,84
	120	óptimo-rango	4	0,975	74,92-75,22	3,77-3,84	6	6,77	10,08	8,40	259 376,33
	1560	óptimo-rango	7	0,979	75,08-75,24	3,76-3,80	6	6,59	10,05	8,77	255 208,53
	10	óptimo-VAN	8	0,964	75,62	4,13	6	9,21	9,07	9,11	319 824,72
	120	óptimo-rango	6	0,958	75,05-75,20	3,76-3,80	6	6,56	10,05	8,76	256074,97
	1560	óptimo-VAN	6	0,980	75,66	4,05	6	9,05	9,18	9,17	247 961,17
Segundo	10	óptimo calidad	- 8	1,163	75,61	4,11	6	9,13	9,16	9,12	301 316,87
	120	óptimo-rango	2	1,226	74,67-76,80	3,64-4,16	6	6,19	10,12	8,34	258 141,57
	1560	óptimo-rango	4	1,097	74,54-76,61	3,63-4,16	6	6,40	10,00	9,03	250 311,94

(*: Lotes aleatorios al año), (**: Número de la simulación), (***: Área del Evaporador 3), Producción (Prod.*), simulación (Sim. **), Área de transferencia de calor en el evaporador 3 (Á***.Evap3), (****: viscosidad), (*****: Presencia de cristales) (*****: sabor) **Fuente:** Elaboración propia

CONCLUSIONES

1. Los modelos obtenidos para la optimización del proceso tecnológico fueron, el modelo de calidad con el cual se optimizan los atributos de la miel (sabor, presencia de cristales y viscosidad), y el modelo económico. Los modelos de calidad y económico para la determinación de las condiciones óptimas de los parámetros operacionales que hacen máximo al VAN.
2. La simulación utilizando los modelos obtenidos se puede emplear como una primera estrategia de optimización, ya que en cada estudio de caso, se logró la reducción de la incertidumbre de los rangos de los parámetros operacionales, constituyendo los rangos óptimos ((74,56 -74,79) °Brix y (3,76 - 3,80) pH) y del número de productos defectuosos, con el consecuentemente incremento del valor del VAN.
3. La optimización del proceso de obtención de la miel de caña de azúcar utilizando los modelos óptimos encontrados cuenta con dos estrategias de optimización las cuales pueden ser empleadas durante el diseño de nuevas tecnologías y así mejorar los atributos de calidad del producto final. Para el caso de la estrategia de optimización del VAN los valores fueron ((75,68) °Brix y (4,10) pH) y para la estrategia de optimización de la calidad los valores fueron (75,61) °Brix y (4,11) pH).
4. Los valores obtenidos de los parámetros operacionales para las tres estrategias de optimización, la generación de varios escenarios aleatorios y los modelos matemáticos permitieron obtener los valores óptimos de ((75,68) °Brix y (4,10) pH) que maximizan los indicadores económicos como los de calidad.

RECOMENDACIONES

1. Que se validen los resultados obtenidos en esta investigación de forma experimental (a nivel de laboratorio y a nivel industrial) para validar tanto el procedimiento de trabajo como los modelos propuestos.
2. Que se incorporen otros parámetros operacionales (temperatura, tiempo) en la modelación matemática y al procedimiento (condiciones aleatorias) de trabajo propuesto que permita acercarse a las condiciones reales de producción de la miel de caña en el contexto amazónico.

3. Que se aplique la metodología propuesta en este trabajo a otros procesos que utilizan la caña de azúcar como materia prima y que se producen en la región amazónica.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelhamid, T. S. (2003). *Six Sigma in lean construction systems: opportunities and challenges*. Paper presented at the Proceedings of the Eleventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction IGLC-11, Blacksburg, VA, USA.
- Al Lagtah, N. M. A., Al Habsi, S., y Onaizi, S. A. (2015). Optimization and performance improvement of Lekhwair natural gas sweetening plant using Aspen HYSYS. *Natural Gas Science and Engineering*, 26, 367-381. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2015.06.030>
- Aldana, D. M., y La Madrid, R. (2013). *Metodología unidimensional para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para pailas de hornillas paneleras*. Paper presented at the 17 th Latin American and Caribbean conference for engineering and technology LACCEI.
- Alfaro Herrera, O. F., García Cárcamo, R. A., y Renderos Arrué, J. C. (2015). La generación de color en el proceso de producción de azúcar: Proceso fabril. *ResearchGate Technical Report*, 1, 10. doi:DOI: 10.13140/RG.2.1.2113.9362
- Alvarez, H., Lamanna, R., Vega, P., y Revollar, S. (2009). Metodología para la obtención de modelos semifísicos de base fenomenológica aplicada a una sulfitadora de jugo de caña de azúcar. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 6(3), 10-20. doi:[https://doi.org/10.1016/S1697-7912\(09\)70260-2](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70260-2)
- Batanero, C. (2005). Significados de la probabilidad en la educación secundaria. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa*, 8(3), 247-263.
- Benítez Cortés, I., Pérez Martínez, A., Barrios Rodríguez, M. A., Rodríguez Machado, A., y Pérez Sánchez, A. (2018). Simulación de una planta de producción de aceite de moringa empleando el simulador de procesos Superpro Designer. 38(2), 236-247.
- Bird, R. B., Stewart, W. E., y Lightfoot, E. N. (1992). *Fenómenos de transporte* (R. S. A. Ed. 1ra Edición ed.): REVERTÉ. S. A.
- Bohórquez Castellanos, J. J., Porras Díaz, H., Sánchez Rivera, O. G., y Mariño Espinel, M. C. (2018). Planificación de recursos humanos a partir de la simulación del proceso constructivo en modelos BIM 5D*. *Entramado*, 14(1), 252-267. doi:10.18041/entramado.2018v14n1.27106
- Bon, J., Clemente, G., Vaquiro, H., y Mulet, A. (2010). Simulation and optimization of milk pasteurization processes using a general process simulator (ProSimPlus). *Informática e Ingeniería Química*, 34(3), 414-420. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.013>
- Briñez Javela, I. A., Ramírez Navas, J. S., y Bolaños Cardona, L. (2018). Evaluación termodinámica de variables críticas en la estabilidad de la panela de caña de azúcar. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 14(2), 1-11.
- Brito Vallina, M. L., Alemán Romero, I., Fraga Guerra, E., Para García, J. L., y Arias de Tapia, R. I. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Ingeniería Mecánica*, 14(2), 129-139.
- Caron, E., Chaumette, S., Contassot-Vivier, S., Desprez, F., Fleury, E., Gomez, C., . . . Lazure, D. (2001). SCILAB to SCILAB: the Ouragan project. *Computación paralela*, 27(11), 1497-1519.
- Castillo Peña, A., Labrada Vázquez, B. L., Penedo Medina, M., y Sánchez del Campo lafita, A. E. (2013). Simulación del proceso de producción de biodiésel a partir del aceite de *Jatropha curcas*. *Tecnología Química*, XXXIII(2), 107-120.
- Norma para el jugo de caña de azúcar deshidratado no centrifugado, (2018).

- Cruz Trejos, E. A., Medina Varela, P. D., y Salazar Arias, H. D. (2013). Optimización de portafolios de acciones utilizando los multiplicadores de Lagrange. *Scientia et Technica*, 18(1), 114-119. doi: <http://dx.doi.org/10.22517/23447214.8301>
- De María, G., Corral, C. M., y Jaffé, W. (2013). Panela : el edulcorante nutritivo natural. *Agro FOOD Industry HI Tech*, 24(6), 44-48.
- Eaton, J. W., Bateman, D., Hauberg, S., y Wehbring, R. (2020). *Free Your Numbers* (5ta Edición ed.).
- García Ligerero, M. J., y Román, P. (2011). Una herramienta interactiva como guía en la resolución gráfica de un problema de programación lineal. *Revista de investigación operacional*, 32(3), 283-290.
- Godefroid, P., Levin, M. Y., y Molnar, D. (2012). SAGE: whitebox fuzzing for security testing. *acmqueue*, 10(1), 20-27.
- Gómez Salazar, J. A., Clemente Polo, G., y Sanjuán Pelliccer, N. (2015). Review of mathematical models to describe the food salting process. *Dyna*, 82(190), 23-30.
- González, L. A., Venegas, J. C., y Garzón, D. A. (2009). Solución numérica de modelos biológicos de reacción difusión en dominios fijos mediante el método de los elementos finitos. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (48), 65-75.
- Gutiérrez, V., y Vidal, C. J. (2008). Inventory management models in supply chains: A literature review. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(43), 134-149.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. d. P. (2010). *Metodología de la investigación* (M. G. Hill Ed. Quinta edición ed.). Mc Graw Hill.
- Herrera, O. J., y Becerra, L. A. (2014, July 22-24). *Diseño general de las etapas de simulación de procesos con énfasis en el análisis de entrada*. Paper presented at the 12th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology.
- Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC) 2018, (2019).
- INEC. (2020). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC) 2019. In (pp. 43).
- Iranzo, N., y Fortuny, J. M. (2009). La influencia conjunta del uso de GeoGebra y lápiz y papel en la adquisición de competencias del alumnado. *Enseñanza de las Ciencias*, 27(3), 433-446.
- Jacovkis, P. M. (2005). Computadoras, modelización matemática y ciencia experimental. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad - CTS*, 2(5), 51-63.
- Jaffé, W. R. (2012). Health effects of non-centrifugal sugar (NCS): a review. *Sugar Tech*, 14(2), 87-94.
- Keller, P. (2011). *Six sigma demystified*: McGraw-Hill.
- Kroll, A., Havre, K., Modén, P., y Hess, T. (2001). Dynamic Solutions de ABB la mejor tecnología disponible para la optimización avanzada de aplicaciones. *Revista ABB*(4), 46-54.
- La Madrid, R., Marcelo, D., Orbegoso, E. M., Saavedra, R., y Management. (2016). Heat transfer study on open heat exchangers used in jaggery production modules—Computational Fluid Dynamics simulation and field data assessment. *Energy Conversion and Management*, 125, 107-120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.005>
- Lázaro, E. B., Álvarez Zapata, H. D., Gómez, C. A., Vega Cruz, P., Cánepa, L. G., Normey Rico, J. E., . . . Echevarría, R. M. (2011). *Libro blanco del control automático en la industria de la caña de azúcar* (J. R. Perán González Ed.).
- Maldonado Maldonado, J. I., Márquez Romance, A. M., Guevara Pérez, E., Pérez, S., y Rey Lago, D. (2018). Model development for the design of an anaerobic upflow filter

- separated in two and three phases. *Dyna*, 85(207), 44-53. doi:10.15446/dyna.v85n207.69783
- Medina, E. A. (2011). *Introducción al Diseño Básico de los Procesos Químicos*. México D.F.,.
- Mendieta Menjura, O. A., y Hernández, H. E. (2013). Análisis experimental de la evaporación del jugo de caña de azúcar en película sobre una placa plana. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.*, 14(2), 113-127.
- Mete, M. R. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Fides et ratio*, 7, 67-85.
- Mora, R., y Granados, R. (2012). Análisis de estabilidad de taludes considerando la incertidumbre de los datos: Caso comunidad de mansiones de montes de oca, san josé, costa rica. *Revista Geológica de América Central*(47), 133-141.
- Mosquera, S. A., Carrera, J. E., y Villada, H. S. (2007). Variables que afectan la calidad de la panela procesada en el departamento del Cauca. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 5, 11.
- Navarro Pérez, D., y Llerena Chávez, H. (2016). *Análisis de estrategias para incorporar Aspen hysys en el plan de estudios de la carrera de pregrado de ingeniería civil química*. Paper presented at the Congreso chileno de educación en ingeniería UFRO 2016, Chile. https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://sochedi2016.ufro.cl/wp-content/uploads/2016/10/SOCHEDI_2016_paper_90.pdf&hl=en_US
- Osorio Saraz, J. A., Ciro Velasquez, H. J., y Espinosa Bedoya, A. (2010). Evaluación térmica y validación de un modelo por métodos computacionales para la hornilla panelera GP 150. *Dyna*(162), 237-247.
- Peñuela Meneses, C. A., y Echeverri, M. G. (2007). Optimización multiobjetivo usando un algoritmo genético y un operador elitista basado en un ordenamiento no-dominado (NSGA-II). *Scientia et technica*, 1(35), 175-180. doi:<http://dx.doi.org/10.22517/23447214.5393>
- Pérez Hernández, M. (2012). Estimación de incertidumbres. Guía GUM. *Revista Española de Metrología*, 1(3), 113-130.
- Pérez, S. A., Niño, Z. M., y Llobregat, M. J. (2004). Desarrollo de un programa de simulación de procesos para el tratamiento de emisiones atmosféricas. *Información tecnológica*, 15(2), 55-62. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642004000200010>
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., y West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*: McGraw-Hill Education.
- Pinazo Calatayud, D. (2006). Conducta proactiva en situaciones de incertidumbre cultural y situacional. *Revista de Psicología del Trabajo y de las Organizaciones*, 22(2), 133-149.
- Ping Sung, L., y Chein Hua, L. (2015). Applying Open Source Softwares Fritzing and Arduino to Course Design of Embedded Systems. *International Journal of Automation Control Engineering* 4(1), 40-44. doi:<https://doi.org/10.12783/ijace.2015.0401.10>
- Quezada Moreno, W. F., Gallardo Aguilar, I., y Quezada Torres, W. (2015). Temperatura y concentración del jugo de caña según pisos climáticos en Ecuador. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 49(1), 17-21.
- Quezada Moreno, W. F., González Suárez, E., Torres Quezada, D. W., y Aguas, M. (2016). Cane Honey: Process, Quality and Harmlessness. *International Journal of Engineering Research*, 5(7), 589-593. doi:<https://doi.org/10.17950/ijer/v5s7/709>

- Quezada, W. F., Quezada Torres, W. D., y Molina Borja, F. A. (2018). *Agroindustria panelera: Alternativa para su Intensificación*. Paper presented at the KEngineering, Science and Technology Conference (2017). <https://knepublishing.com/index.php/KnE-Engineering/article/view/1409>
- Ramírez De La O, I. L., Nava Bernal, G., Osorio García, M., y Franco Maass, S. (2011). Ambigüedad e incertidumbre en desarrollo sustentable (ds) y turismo sustentable (ts): sus implicaciones epistemológicas. *Ciencia y Sociedad*, XXXVI(1), 7-28.
- Rocha Muñoz, C. I. (2015). *Metodología de la investigación* (A. I. L. Guadalupe Ed. Primera edición ed.): Oxford University Press.
- Rodríguez Gallegos, R., y Quiroz Rivera, S. (2016). El rol de la experimentación en la modelación matemática. *Educación matemática*, 28(3), 91-144.
- Sablón Cossío, N., Pérez Quintana, M. L., Acevedo Suárez, J. A., Chacón Guerra, E., y Villalba Pozo, V. (2016). La integración en la cadena agroalimentaria de panela en el Puyo-Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 128-135. doi:<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29471.56480>
- Sánchez Castro, Z., y Mendieta Menjura, O. A. (2014). Ajuste de un modelo matemático para la combustión de bagazo de caña en una cámara Ward-Cimpa. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15, 133-151.
- Santos Fernández, E. (2012). *Multivariate statistical quality control using R* (Vol. 14): Springer Science & Business Media.
- Scenna, N. J., Aguirre, P. A., Benz, S. J., Chiotti, O. J., Espinosa, H. J., Ferrero, M. B., . . . Vega, J. (1999). *Modelado, simulación y optimización de procesos químicos* (N. J. Scenna Ed.).
- Sierra, C. M., y Álvarez, H. D. (2007). Inclusión de un índice de estimación de incertidumbre, distribución y cohesión de datos en el modelamiento borroso. *Avances en Sistemas e Informática*, 4(1), 47-58.
- Silva, P., Silva, C. L., Perestrelo, R., Nunes, F. M., y Câmara, J. S. (2018). Fingerprint targeted compounds in authenticity of sugarcane honey-An approach based on chromatographic and statistical data. *LWT-Food Science and Technology*, 96, 82-89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.076>
- Silva Rodríguez, J., Díaz Cárdena, C., y Galindo Carabalí, J. (2017). Herramientas cuantitativas para la planeación y programación de la producción: estado del arte. *Ingeniería industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, V(18), 99-114.
- Tarifa, E. E., Erdmann, E., Humana, D., Franco Domínguez, S., y Mercado Fuentes, L. (2008). Determinación de la curva de destilación flash para cortes de petróleo utilizando simuladores comerciales. *Ingeniería e Investigación*, 28(1), 50-56.
- Téllez Mora, P., Peraza Luna, F., Feria Velasco, A., y Andrade González, I. (2012). Optimización del proceso de fermentación para la producción de tequila, utilizando la metodología de superficie de respuesta (MSR). *Revista mexicana de ingeniería química*, 11(1), 163-176.
- Venegas, C., Manga, J., Abad, D., y Ribes, J. (2004). Efecto del número de ciclos anóxicos/aerobios sobre la eliminación biológica de nitrógeno en un sistema de fangos activados en discontinuo (SBR). *Ingeniería y Desarrollo*(15), 45-56.
- Vergara, G., Avilez, A., y Romero, J. (2016). Uso de Matlab como herramienta computacional para apoyar la enseñanza y el aprendizaje del álgebra Lineal. *Revista Del Programa De Matemáticas*, 3(1), 84-91.
- Vílchez Quesada, E. (2015). Solving recurrence relations supported by Wolfram Mathematica. *Uniciencia*, 29(1), 16-41. doi:<https://doi.org/10.15359/ru.29-1.2>
- Villalba Vidales, J. A., y Arzola de la Peña, N. (2015). Modelos matemáticos y experimentales sobre el secado de biomasa. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(2), 301-330.

- Wen, X., y Siqin, T. (2019). ¿How do product quality uncertainties affect the sharing economy platforms with risk considerations? A mean-variance analysis. *International Journal of Production Economics*, 224, 1-31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107544>
- Xing, J., Luo, Y., y Gao, Z. (2020). A global optimization strategy based on the Krigin model and parallel computing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00158-020-02495-6>

ANEXOS

Anexo 1. Modelos matemáticos desarrollados y utilizados en la simulación en el análisis económico

Modelos matemáticos		
Costo de Inversión	$\begin{aligned} \text{CostoAdqEquiposRef} \\ = \text{RangFAOCostAdq} * \text{JCSEvap3} \end{aligned}$	Ecuación 56
	$\begin{aligned} \text{CostoAdqEquipos} \\ = \text{CostoAdqEquiposRef} \\ * \left(\frac{\text{IndCostAct}}{\text{IndCostRef}} \right) \end{aligned}$	Ecuación 57
	$\begin{aligned} \text{CostInstalac} = \text{CostoAdqEquipos} \\ * \text{PorcientoCostInstalac} \end{aligned}$	Ecuación 58
	$\begin{aligned} \text{CostInstrum} = \text{CostoAdqEquipos} \\ * \text{PorcientoCostInstrum} \end{aligned}$	Ecuación 59
	$\begin{aligned} \text{CostTuber} = \text{CostoAdqEquipos} \\ * \text{PorcientoCostTuber} \end{aligned}$	Ecuación 60
	$\begin{aligned} \text{CostInstalelec} \\ = \text{CostoAdqEquipos} \\ * \text{PorcientoCostInstalele} \end{aligned}$	Ecuación 61
	$\text{CostEdif} = \text{CostoAdqEquipos} * \text{PorcientoCostEdif}$	Ecuación 62
	$\begin{aligned} \text{CostPrepterreno} \\ = \text{CostoAdqEquipos} \\ * \text{PorcientoCostPrepterreno} \end{aligned}$	Ecuación 63
	$\begin{aligned} \text{CostRequerimProces} \\ = \text{CostoAdqEquipos} \\ * \text{PorcientoCostRequerimProces} \end{aligned}$	Ecuación 64
	$\begin{aligned} \text{CostTerrenos} \\ = \text{CostoAdqEquipos} \\ * \text{PorcientoCostTerrenos} \end{aligned}$	Ecuación 65

	$\begin{aligned} & \text{CostosDirectInvers} \\ & = \text{CostInstalac} + \text{CostInstrum} \\ & + \text{CostTuber} + \text{CostInstalelec} \\ & + \text{CostEdif} + \text{CostPrepterreño} \\ & + \text{CostRequerimProces} \\ & + \text{CostTerrenos} + \text{CostoAdqEquipos} \end{aligned}$	Ecuación 66
	$\begin{aligned} & \text{CostIngenysupervis} \\ & = \text{CostoAdqEquipos} \\ & * \text{PorcientoCostIngenysupervis} \end{aligned}$	Ecuación 67
	$\begin{aligned} & \text{Gastosconstruct} \\ & = \text{CostoAdqEquipos} \\ & * \text{PorcientoGastosconstruct} \end{aligned}$	Ecuación 68
	$\begin{aligned} & \text{CostosIndirectInvers} \\ & = \text{CostIngenysupervis} \\ & + \text{Gastosconstruct} \end{aligned}$	Ecuación 69
	$\begin{aligned} & \text{Honorarios} = \text{CostoAdqEquipos} \\ & * \text{PorcientoHonorarios} \end{aligned}$	Ecuación 70
	$\begin{aligned} & \text{Imprevistos} = \text{CostoAdqEquipos} \\ & * \text{PorcientoImprevistos} \end{aligned}$	Ecuación 71
	$\begin{aligned} & \text{CapitalFijoInvertido} \\ & = \text{CostosIndirectInvers} \\ & + \text{CostosDirectInvers} + \text{Honorarios} \\ & + \text{Imprevistos} \end{aligned}$	Ecuación 72
	$\begin{aligned} & \text{CapitalTrabajo} \\ & = \text{CostoAdqEquipos} \\ & * \text{PorcientoCapitalTrabajo} \end{aligned}$	Ecuación 73
	$\begin{aligned} & \text{CapitalTotalInvertido} \\ & = \text{CapitalFijoInvertido} \\ & + \text{CapitalTrabajo} \end{aligned}$	Ecuación 74
Costos de	$\text{ValTotAnuPanel} = \text{PrecMiel} * \text{MontAnuPanel}$	Ecuación 75
Producción	$\text{CostAnuCa} = \text{PrecCa} * \text{MontAnuCa}$	Ecuación 76

$CostLabAnu = NumOpPar * NumTurnosTrab * CostOpH * 8 * DiasdTrabAnho$	Ecuación 77
$MVap = Qced/LandaVapQced$	Ecuación 78
$ReqAnuVap = (MVapEvap1 + MVapEvap2 + MVapEvap2 + MVapEvap3 + MVapConcent) * 5 * 365$	Ecuación 79
$CostUtilAnuVap = CostUnitVap * ReqAnuVap$	Ecuación 80
$CostTFacAux = CostUtilAnuVap$	Ecuación 81
$SupOp = 0.15 * CostLabAnu$	Ecuación 82
$MantYRepar = 0.06 * CapitalFijoInvertido$	Ecuación 83
$SuministrOp = 0.15 * MantYRepar$	Ecuación 84
$CargLab = 0.15 * CostLabAnu$	Ecuación 85
$ImpuestPropied = 0.02 * CapitalFijoInvertido$	Ecuación 86
$Seguro = 0.01 * CapitalFijoInvertido$	Ecuación 87
$CargosFij = ImpuestPropied + Seguro$	Ecuación 88
$PlantSupGen = 0.6 * (CostLabAnu + SupOp + MantYRepar)$	Ecuación 89
$Admisnitr = 0.2 * (CostLabAnu + SupOp + MantYRepar)$	Ecuación 90
$CostTProductSinDeprec = (CostAnuCa + CostLabAnu + SupOp + CostTFacAux + MantYRepar + SuministrOp + CargLab + ImpuestPropied + Seguro + PlantSupGen + Admisnitr)/(1 - 0.01 - 0.05 - 0.04)$	Ecuación 91
$Regalias = 0.01 * CostTProductSinDeprec$	Ecuación 92

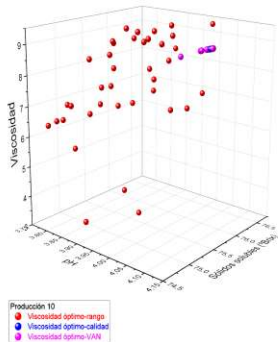
	$\begin{aligned} \text{CostVariables} &= \text{CostAnuCa} + \text{CostLabAnu} + \text{SupOp} \\ &+ \text{CostTFacAux} + \text{MantYRepar} \\ &+ \text{SuministrOp} + \text{CargLab} \\ &+ \text{Regalias} \end{aligned}$	Ecuación 93
	$\begin{aligned} \text{CostFabricacion} &= \text{CostVariables} + \text{CargosFij} \\ &+ \text{PlantSupGen} \end{aligned}$	Ecuación 94
	$\text{DistribyVents} = 0.05 * \text{CostTProductSinDeprec}$	Ecuación 95
	$\begin{aligned} \text{InvestyDesarrollo} &= 0.04 * \text{CostTProductSinDeprec} \end{aligned}$	Ecuación 96
	$\begin{aligned} \text{Gastgenerales} &= \text{Admisnitr} + \text{DistribyVents} \\ &+ \text{InvestyDesarrollo} \end{aligned}$	Ecuación 97
Flujos de caja	$\text{IngNeg1} = 0$	Ecuación 98
	$\text{IngNeg1} = 0$	Ecuación 99
	$\text{EgNeg1} = \text{CapitalTotalInvertido}$	Ecuación 100
	$\text{FlujCNeg1} = \text{IngNeg1} - \text{EgNeg1}$	Ecuación 101
	$\text{Ing0} = (\text{MontAnuPanel} * 0.3) * \text{PrecPanel}$	Ecuación 102
	$\text{Eg0} = \text{CostTProductSinDeprec} * 0.3$	Ecuación 103
	$\text{FlujC0} = (\text{Ing0} - \text{Eg0}) + \text{FlujCNeg1}$	Ecuación 104
	$\text{Ing1} = (\text{MontAnuPanel} * 0.35) * \text{PrecPanel}$	Ecuación 105
	$\text{Eg1} = \text{CostTProductSinDeprec} * 0.35$	Ecuación 106
	$\text{FlujC1} = (\text{Ing1} - \text{Eg1}) + \text{FlujC0}$	Ecuación 107
	$\text{Ing2} = (\text{MontAnuPanel} * 0.45) * \text{PrecPanel}$	Ecuación 108
	$\text{FlujC2} = (\text{Ing2} - \text{Eg2}) + \text{FlujC1}$	Ecuación 109
	$\text{Ing3} = (\text{MontAnuPanel} * 0.50) * \text{PrecPanel}$	Ecuación 110
	$\text{Eg3} = \text{CostTProductSinDeprec} * 0.50$	Ecuación 111
	$\text{FlujC3} = (\text{Ing3} - \text{Eg3}) + \text{FlujC2}$	Ecuación 112
$\text{Ing4} = (\text{MontAnuPanel} * 0.60) * \text{PrecPanel}$	Ecuación 113	
$\text{Eg4} = \text{CostTProductSinDeprec} * 0.60$	Ecuación 114	
$\text{FlujC4} = (\text{Ing4} - \text{Eg4}) + \text{FlujC3}$	Ecuación 115	

		$Ing5 = (MontAnuPanel * PrecPanel) * 0.70$	Ecuación 116
		$Eg5 = CostTProductSinDeprec * 0.70$	Ecuación 117
		$FlujC5 = (Ing5 - Eg5) + FlujC4$	Ecuación 118
		$Ing6 = (MontAnuPanel * 0.50) * PrecPanel$	Ecuación 119
		$Eg6 = CostTProductSinDeprec * 0.50$	Ecuación 120
		$FlujC6 = (Ing6 - Eg6) + FlujC5$	Ecuación 121
		$Ing7 = (MontAnuPanel * 0.45) * PrecPanel$	Ecuación 122
		$Eg7 = CostTProductSinDeprec * 0.45$	Ecuación 123
		$FlujC7 = (Ing7 - Eg7) + FlujC6$	Ecuación 124
		$Ing8 = (MontAnuPanel * 0.40) * PrecPanel$	Ecuación 125
		$Eg8 = CostTProductSinDeprec * 0.40$	Ecuación 126
		$FlujC8 = (Ing8 - Eg8) + FlujC7$	Ecuación 127
		$Ing9 = (MontAnuPanel * 0.35) * PrecPanel$	Ecuación 128
		$Eg9 = CostTProductSinDeprec * 0.35$	Ecuación 129
		$FlujC9 = (Ing9 - Eg9) + FlujC8$	Ecuación 130
		$Ing10 = (MontAnuPanel * 0.30) * PrecPanel$	Ecuación 131
		$Eg10 = CostTProductSinDeprec * 0.30$	Ecuación 132
		$FlujC10 = (Ing10 - Eg10) + FlujC9$	Ecuación 133
Indicadores dinámicos económicos	Valor actual neto	$VAN = npv(0.35, a, EgNeg1)$	Ecuación 134
	Tasa interna de retorno	$TIR = irr(a, EgNeg1)$	Ecuación 135
	Periodo de recuperación	$Pr = A + [(CapitalTotalInvertido - sumaF)/FlujC3]$	Ecuación 136
	Ingresos totales	$IngTotal = (Ing0 + Ing1 + Ing2 + Ing3 + Ing4 + Ing5 + Ing6 + Ing7 + Ing8 + Ing9 + Ing10)/11$	Ecuación 137
	Egresos totales	$EgTotal = (Eg0 + Eg1 + Eg2 + Eg3 + Eg4 + Eg5 + Eg6 + Eg7 + Eg8 + Eg9 + Eg10)/11$	Ecuación 138

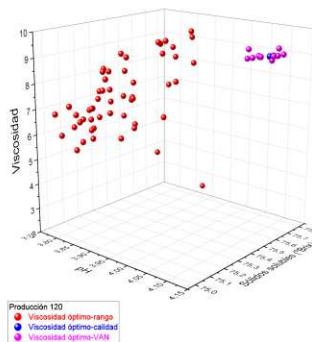
	Margen de ganancias	MargenGanancias = $\frac{\text{IngTotal} - \text{EgTotal}}{\text{IngTotal}}$	Ecuación 139
--	---------------------	---	--------------

Fuente: Elaboración propia

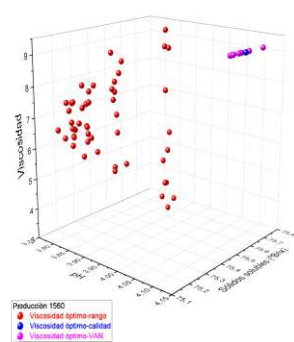
Anexo 2. Comportamiento de los atributos de calidad en las tres producciones para el primer estudio de caso. (a, b, c) viscosidad, (d, e, f) presencia de cristales y (g, h, i) sabor



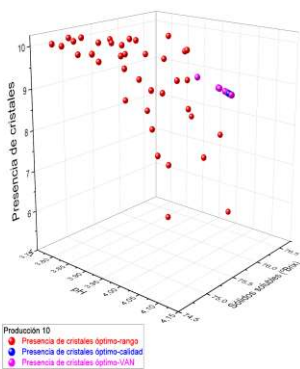
a.



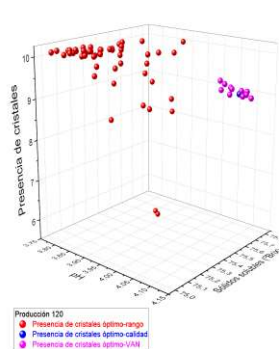
b.



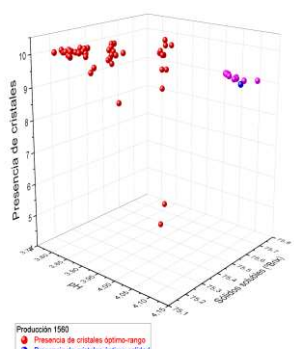
c.



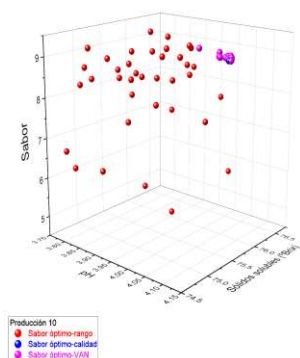
d.



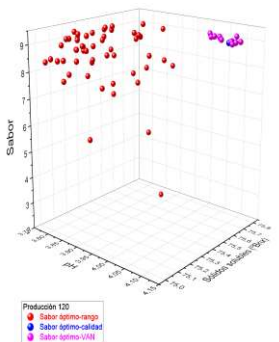
e.



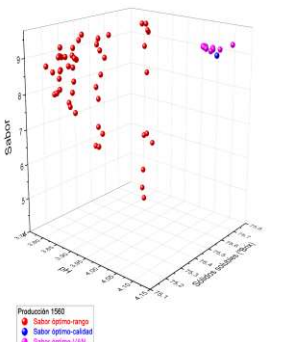
f.



g.



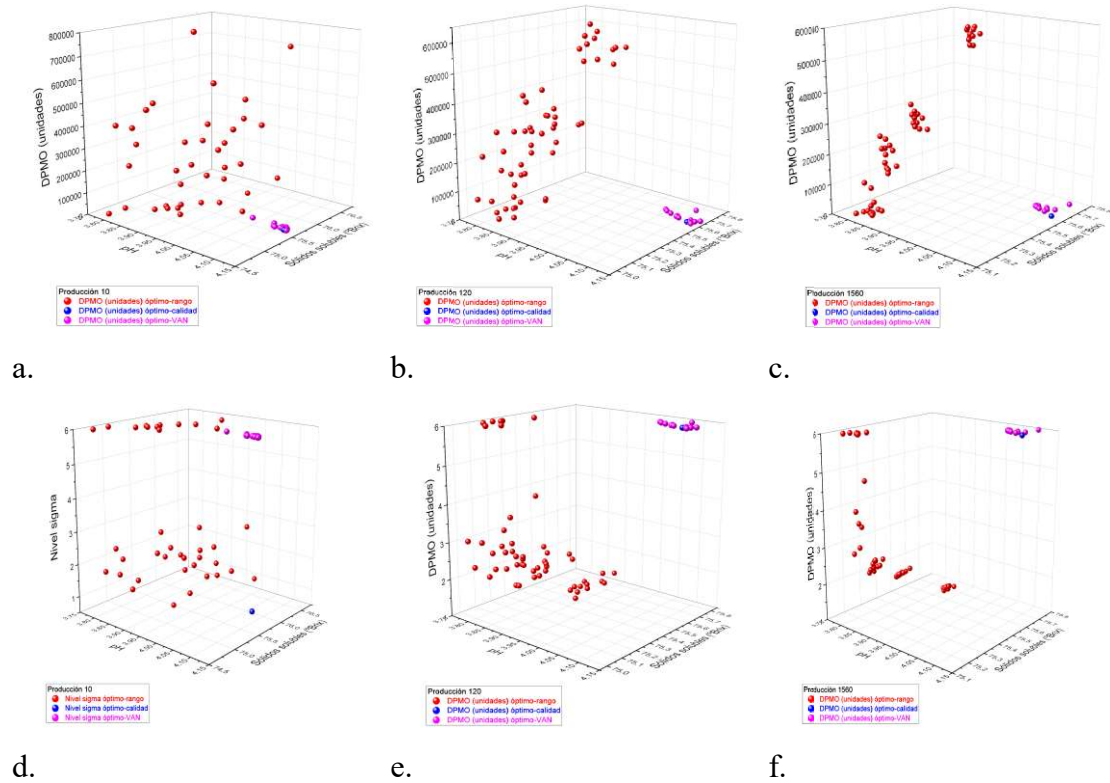
h.



i.

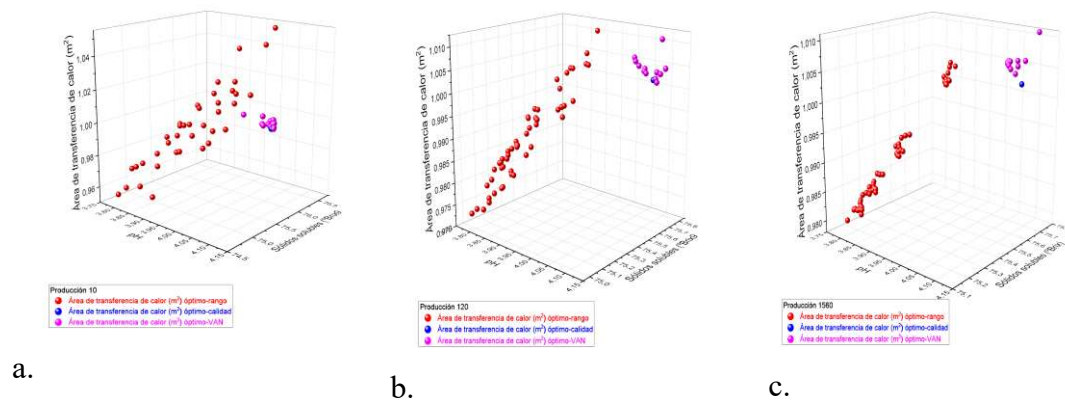
Fuente: Elaboración propia

Anexo 3. Comportamiento del DPMO (unidades) (a, b, c) y nivel sigma (d, e, f) en las tres producciones para el primer estudio de caso



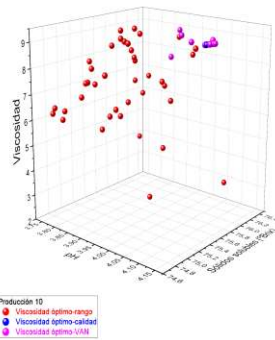
Fuente: Elaboración propia

Anexo 4. Comportamiento del área de transferencia de calor en el evaporador 3 en las tres producciones para el primer estudio de caso

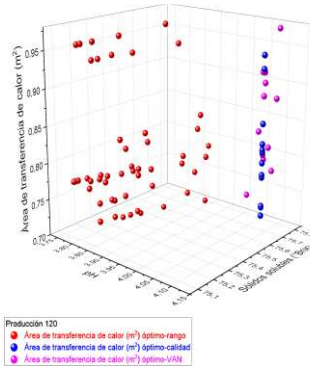


Fuente: Elaboración propia

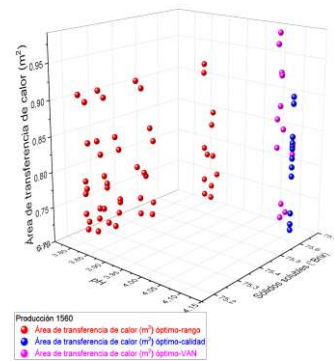
Anexo 5. Comportamiento de los atributos de calidad en las tres producciones para el segundo estudio de caso. (a, b, c) viscosidad, (d, e, f) presencia de cristales y (g, h, i) sabor



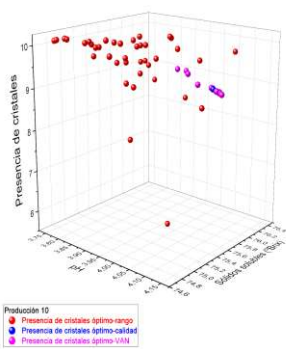
a.



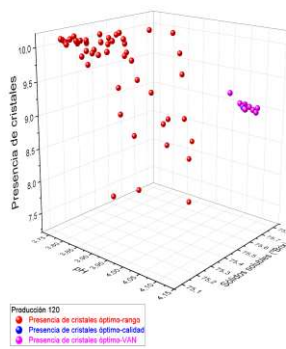
b.



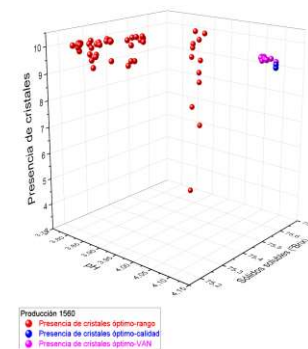
c.



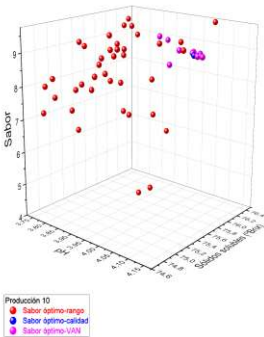
d.



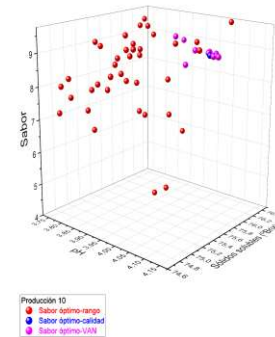
e.



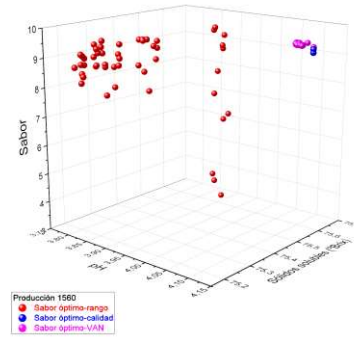
f.



g.



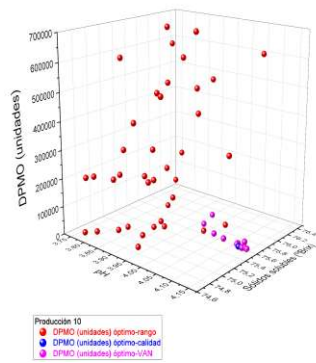
h.



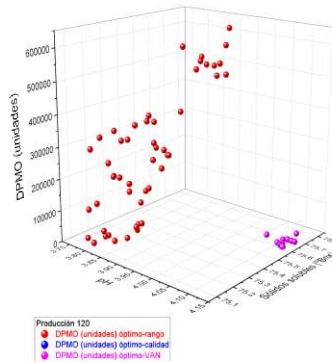
i.

Fuente: Elaboración propia

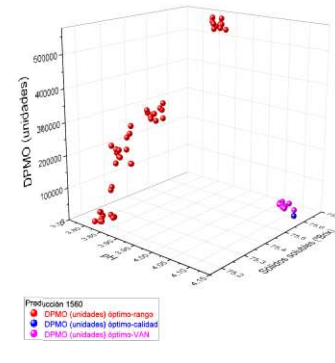
Anexo 6. Comportamiento del DPMO (unidades) (a, b, c) y nivel sigma (d, e, f) en las tres producciones para el segundo estudio de caso



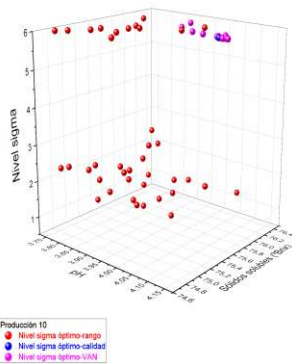
a.



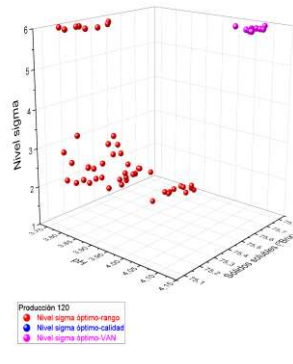
b.



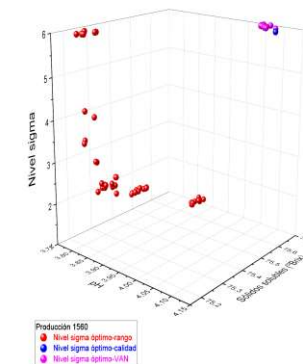
c.



d.



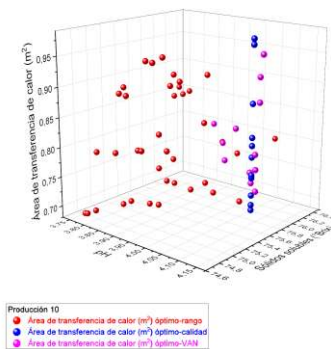
e.



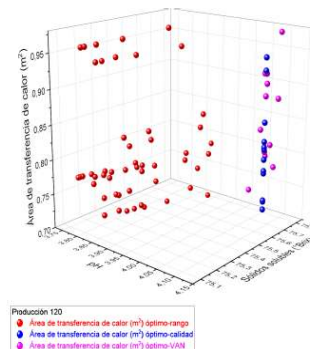
f.

Fuente: Elaboración propia

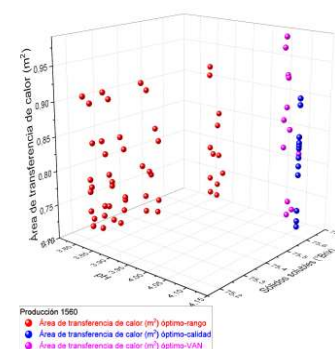
Anexo 7. Comportamiento del área de transferencia de calor en el evaporador 3 en las tres producciones para el segundo estudio de caso



a.

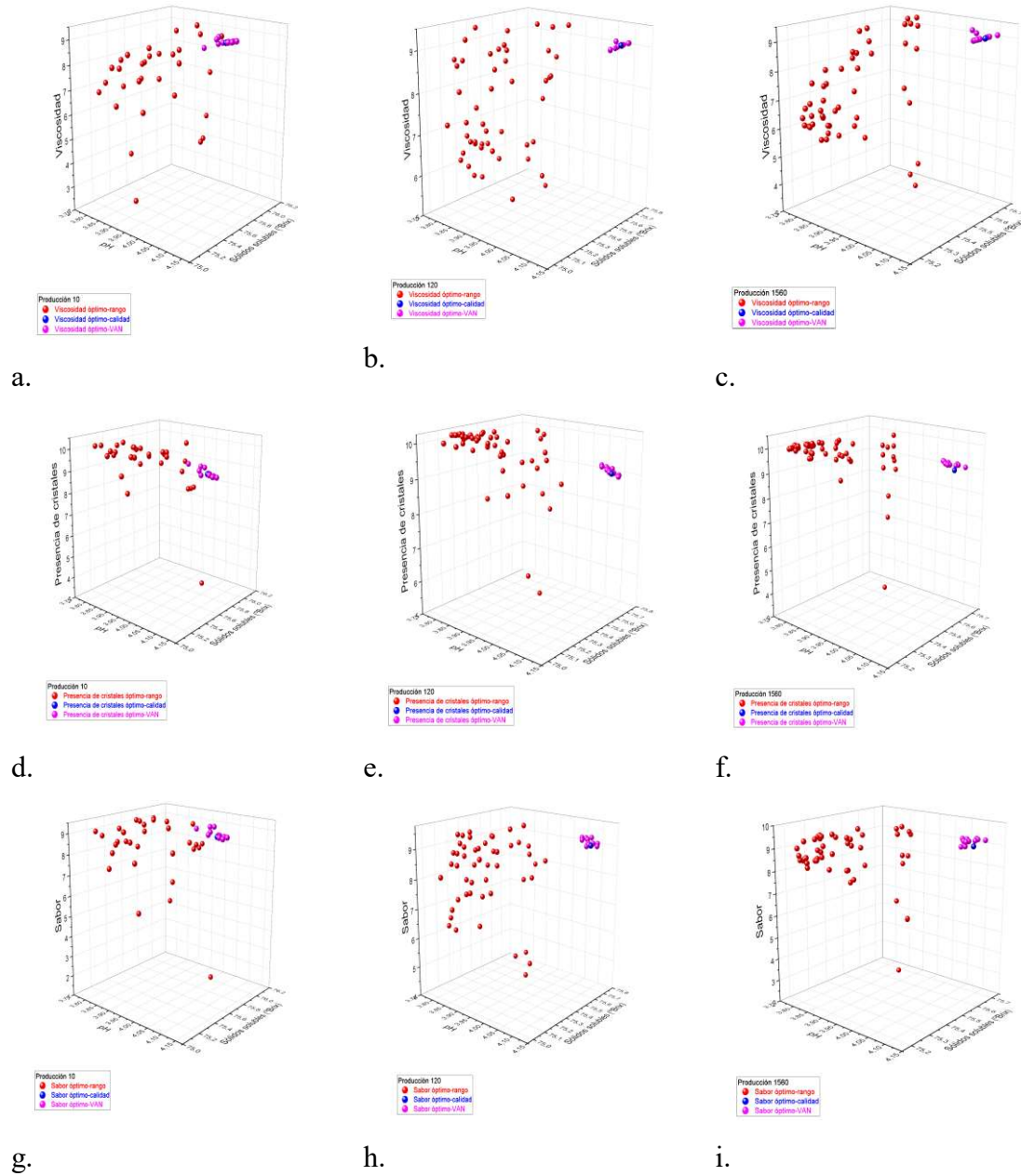


b.



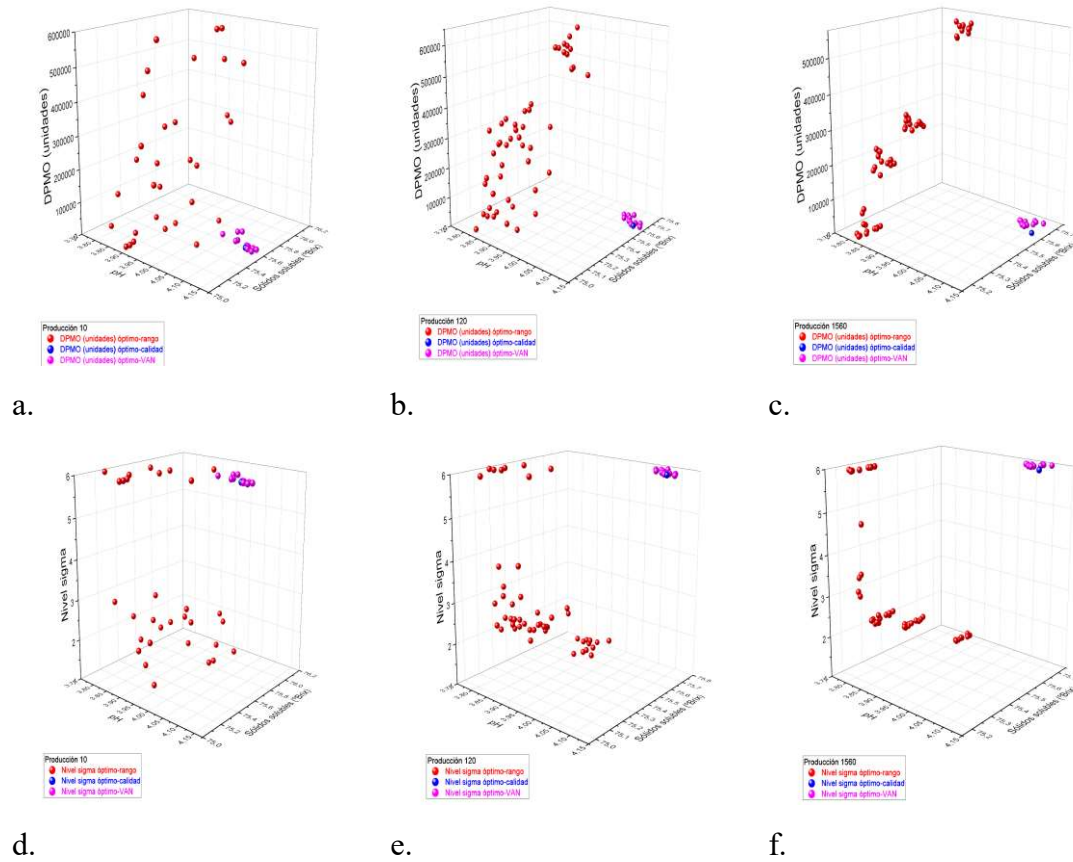
Fuente: Elaboración propia

Anexo 8. Comportamiento de los atributos de calidad en las tres producciones para el tercer estudio de caso. (a, b, c) viscosidad, (d, e, f) presencia de cristales y (g, h, i) sabor



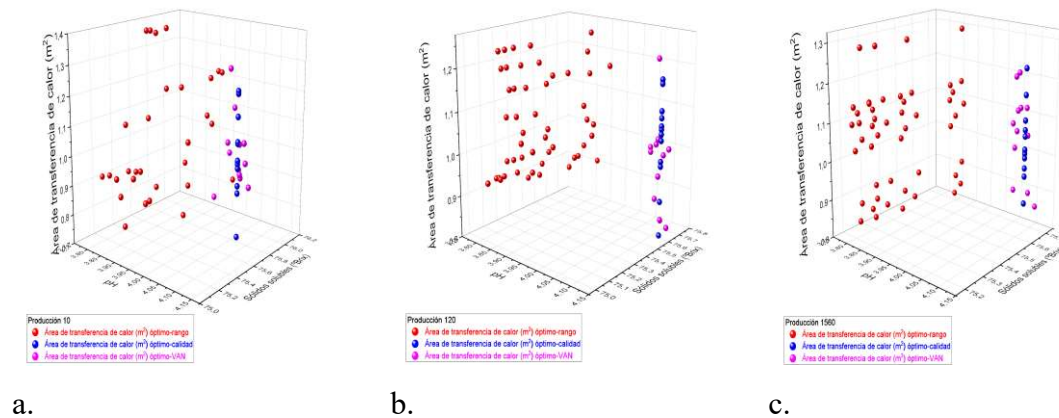
Fuente: Elaboración propia

Anexo 9. Comportamiento del DPMO (unidades) (a, b, c) y nivel sigma (d, e, f) en las tres producciones para el tercer estudio de caso



Fuente: Elaboración propia

Anexo 10. Comportamiento del área de transferencia de calor en el evaporador 3 en las tres producciones para el tercer estudio de caso



Fuente: Elaboración propia