



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

“EVALUACIÓN DE MODELOS CINÉTICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA DEGRADACIÓN DEL LÁTEX NATURAL (*hevea brasiliensis*) EN EL CANTÓN CALUMA”

Trabajo de titulación

Tipo: Proyecto de investigación

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: ELVIS XAVIER PEÑA MEDINA

DIRECTOR: ING. DARÍO FERNANDO GUAMAN LOZADA

Riobamba – Ecuador

2021

© **2021**, Elvis Xavier Peña Medina

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Elvis Xavier Peña Medina, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 12 de abril de 2021

.....
ELVIS XAVIER PEÑA MEDINA
CI: 020226339-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: proyecto de investigación. **EVALUACIÓN DE MODELOS CINÉTICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA DEGRADACIÓN DEL LÁTEX NATURAL (*hevea brasiliensis*) EN EL CANTÓN CALUMA**, realizado por el señor: Elvis Xavier Peña Medina, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
ING. MARCO CHUIZA ROJAS PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2021-12-04
ING. DARÍO GUAMÁN LOZADA DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	2021-12-04
ING. ADRIÁN RODRÍGUEZ PINOS MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2021-12-04

DEDICATORIA

A mis padres por el apoyo incondicional durante el desarrollo de mi etapa estudiantil, también a mis docentes de la carrera de ingeniería química quienes supieron compartir su conocimiento para mi formación profesional.

Elvis

AGRADECIMIENTO

Agradecimientos especiales para mi familia y amigos con quienes he compartido un largo periodo de tiempo en la ESPOCH, por brindarme el apoyo anímico ya que sin ellos no sería posible alcanzar esta meta en mi vida.

Al Ing. Darío Guamán y al Ing. Adrián Rodríguez, les expreso mi gratitud eterna porque son quienes supieron guiarme con enseñanzas y sabiduría en el desarrollo de este trabajo.

Elvis

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xv
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	xvi
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1	MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	6
1.1	Antecedentes de la investigación	6
1.2	Bases conceptuales.....	7
<i>1.2.1</i>	<i>Problemática</i>	<i>7</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Látex natural (Hevea Brasiliensis).....</i>	<i>8</i>
<i>1.2.3</i>	<i>Tipos de látex natural</i>	<i>9</i>
<i>1.2.4</i>	<i>Características</i>	<i>10</i>
<i>1.2.5</i>	<i>Biomasa de látex natural como Potencial Combustible Energético.</i>	<i>11</i>
<i>1.2.6</i>	<i>Propiedades de la biomasa</i>	<i>11</i>
<i>1.2.7</i>	<i>Análisis Termogravimétrico (TGA).....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.8</i>	<i>Análisis Inmediato de la biomasa.....</i>	<i>13</i>
<i>1.2.8.1</i>	<i>Humedad</i>	<i>14</i>
<i>1.2.8.2</i>	<i>Cenizas.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.8.3</i>	<i>Compuestos volátiles.....</i>	<i>15</i>
<i>1.2.8.4</i>	<i>Carbono fijo</i>	<i>15</i>

1.2.9	<i>Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)</i>	15
1.2.10	<i>Generación de energía a partir del látex natural</i>	16
1.2.11	<i>Generación de nuevos productos a partir del Látex natural</i>	16
1.2.12	<i>Modelos cinéticos</i>	16
1.2.12.1	<i>Determinación de orden por ampliación de la teoría de Avrami</i>	18
1.2.12.2	<i>Método de Kissinger</i>	18
1.2.12.3	<i>Método de Flynn-Wall-Ozawa (FWO)</i>	19
1.2.12.4	<i>Método de Friedman</i>	19
1.2.12.5	<i>Método de Coast-Redfern (C-R)</i>	19
1.3	Avances del estudio cinético del látex natural (<i>Hevea Brasiliensis</i>)	20

CAPÍTULO II

2	MARCO METODOLÓGICO	22
2.1	Tipo y diseño de investigación	22
2.1.1	<i>Tipo de investigación</i>	22
2.1.2	<i>Diseño de la investigación</i>	22
2.2	Unidad de Análisis	22
2.3	Población de estudio	23
2.4	Tamaño de muestra	23
2.5	Selección de muestra	23
2.6	Identificación de variables	24
2.7	Técnicas de recolección de datos	24
2.7.1	<i>Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)</i>	24
2.7.2	<i>Análisis inmediato</i>	25
2.7.3	<i>Análisis termogravimétrico TGA</i>	25
2.7.3.1	<i>Modelos cinéticos</i>	26

CAPÍTULO III

3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	27
3.1	Caracterización físico-química del látex natural (<i>Hevea Brasiliensis</i>)	27
3.1.1	<i>Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)</i>	27
3.1.2	<i>Análisis inmediato de la biomasa del látex natural (<i>Hevea Brasiliensis</i>)</i>	28
3.1.3	<i>Poder calorífico superior HHV (High Heating Value)</i>	29
3.1.4	<i>Análisis termogravimétrico</i>	30
3.1.4.1	<i>Obtención de datos para modelos cinéticos</i>	30
3.1.5	<i>Cálculo del modelo cinético</i>	32
3.1.5.1	<i>Determinación de orden de reacción</i>	33
3.1.5.2	<i>Método de Friedman</i>	38
3.1.5.3	<i>Método de Coast-Redfern</i>	44
3.1.5.4	<i>Método de Flynn-Wall-Ozawa (FWO)</i>	59
3.1.5.5	<i>Método de Kissinger</i>	64
3.1.6	<i>Modelo propuesto</i>	69
3.1.6.1	<i>Validación estadística del modelo cinético propuesto</i>	71
	CONCLUSIONES	74
	RECOMENDACIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Composición del látex natural.....	10
Tabla 2-1. Propiedades físicas de ciertos componentes del látex natural.....	10
Tabla 3-1. Poder calorífico de algunos combustibles.	12
Tabla 4-1. Poder calorífico de la biomasa	12
Tabla 5-1. Funciones para la determinación del orden de reacción	20
Tabla 1-2. Determinación del espectro FTIR del látex natural (Hevea Brasiliensis)	24
Tabla 2-2. Obtención de parámetros del análisis inmediato	25
Tabla 1-3. Identificación de grupos funcionales en la muestra	28
Tabla 2-3. Resultados del análisis inmediato.....	29
Tabla 3-3. Resultados del cálculo del poder calorífico	29
Tabla 4-3. Intervalos de temperatura por etapas	33
Tabla 5-3. Valores por etapa, determinación de orden de reacción	38
Tabla 6-3. Resultados por etapa, método de Friedman	43
Tabla 7-3. Resultados por etapa, método de Coast-Redfern	57
Tabla 8-3. Resultados por etapa, método (FWO)	63
Tabla 9-3. Resultados por etapa, método de Kissinger	68
Tabla 10-3. Parámetros cinéticos experimentales y calculados	70
Tabla 11-3. Resumen estadístico para la etapa 3 con $\beta=5$ °C/min	71
Tabla 12-3. Resumen estadístico para la etapa 3 con $\beta=15$ °C/min	71
Tabla 13-3. Intervalos de confianza del 95 % para la tercera etapa con $\beta=5$ °C/min	72
Tabla 14-3. Intervalos de confianza del 95 % para la tercera etapa con $\beta=15$ °C/min	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Productos gaseosos durante la co-pirólisis.....	7
Figura 2-1. Ubicación del cantón Caluma en el contexto nacional.....	8
Figura 3-1. Látex natural (<i>Hevea Brasiliensis</i>) puro.	9
Figura 4-1. Curva termogravimétrica para el análisis inmediato.	14

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3. Análisis FTIR del látex natural (Hevea Brasiliensis)	27
Gráfico 2-3. Representación de los resultados del análisis inmediato	28
Gráfico 3-3. Análisis TGA: $\beta=5$ °C/min.....	30
Gráfico 4-3. Análisis TGA: $\beta=15$ °C/min.....	31
Gráfico 5-3. Grado de avance en función del tiempo $\beta=5$ °C/min	32
Gráfico 6-3. Grado de avance en función del tiempo $\beta=15$ °C/min	32
Gráfico 7-3. Determinación de orden etapa 1 con $\beta=5$ °C/min	34
Gráfico 8-3. Determinación de orden etapa 2 con $\beta=5$ °C/min	34
Gráfico 9-3. Determinación de orden etapa 3 con $\beta=5$ °C/min	35
Gráfico 10-3. Determinación de orden etapa 4 con $\beta=5$ °C/min	35
Gráfico 11-3. Determinación de orden etapa 1 con $\beta=15$ °C/min	36
Gráfico 12-3. Determinación de orden etapa 2 con $\beta=15$ °C/min	36
Gráfico 13-3. Determinación de orden etapa 3 con $\beta = 15$ °C/min.....	37
Gráfico 14-3. Determinación de orden etapa 4 con $\beta=15$ °C/min	38
Gráfico 15-3. Método de Friedman etapa 1 con $\beta=5$ °C/min	39
Gráfico 16-3. Método de Friedman etapa 2 con $\beta=5$ °C/min	40
Gráfico 17-3. Método de Friedman etapa 3 con $\beta=5$ °C/min	40
Gráfico 18-3. Método de Friedman etapa 4 con $\beta=5$ °C/min	41
Gráfico 19-3. Método de Friedman etapa 1 con $\beta=15$ °C/min	41
Gráfico 20-3. Método de Friedman etapa 2 con $\beta=15$ °C/min	42
Gráfico 21-3. Método de Friedman etapa 3 con $\beta=15$ °C/min	42
Gráfico 22-3. Método de Friedman etapa 4 con $\beta=15$ °C/min	43
Gráfico 23-3. Método de (C-R) etapa 1 con orden 0 para $\beta=5$ °C/min	45
Gráfico 24-3. Método de (C-R) etapa 1 con orden 1 para $\beta=5$ °C/min	45
Gráfico 25-3. Método de (C-R) etapa 2 con orden 0 para $\beta=5$ °C/min	46

Gráfico 26-3. Método de (C-R) etapa 2 con orden 1 para $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	46
Gráfico 27-3. Método de (C-R) etapa 3 con orden 0 para $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	47
Gráfico 28-3. Método de (C-R) etapa 3 con orden 1 para $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	47
Gráfico 29-3. Método de (C-R) etapa 4 con orden 0 para $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	48
Gráfico 30-3. Método de (C-R) etapa 4 con orden 1 para $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	48
Gráfico 31-3. Método (C-R) etapa 1 con orden conocido $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	49
Gráfico 32-3. Método (C-R) etapa 2 con orden conocido $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	50
Gráfico 33-3. Método (C-R) etapa 3 con orden conocido $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	50
Gráfico 34-3. Método (C-R) etapa 4 con orden conocido $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	51
Gráfico 35-3. Método (C-R) etapa 1 con orden 0 para $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	51
Gráfico 36-3. Método (C-R) etapa 1 con orden 1 para $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	52
Gráfico 37-3. Método (C-R) etapa 2 con orden 0 para $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	52
Gráfico 38-3. Método (C-R) etapa 2 con orden 1 para $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	53
Gráfico 39-3. Método (C-R) etapa 3 con orden 0 para $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	53
Gráfico 40-3. Método (C-R) etapa 3 con orden 1 para $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	54
Gráfico 41-3. Método (C-R) etapa 4 con orden 0 para $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	54
Gráfico 42-3. Método (C-R) etapa 4 con orden 1 para $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	55
Gráfico 43-3. Método (C-R) etapa 1 con orden conocido $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	55
Gráfico 44-3. Método (C-R) etapa 2 con orden conocido $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	56
Gráfico 45-3. Método (C-R) etapa 3 con orden conocido $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	56
Gráfico 46-3. Método (C-R) etapa 4 con orden conocido $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	57
Gráfico 47-3. Método (FWO) etapa 1 con $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	60
Gráfico 48-3. Método (FWO) etapa 2 con $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	60
Gráfico 49-3. Método (FWO) etapa 3 con $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	61
Gráfico 50-3. Método (FWO) etapa 4 con $\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	61
Gráfico 51-3. Método (FWO) etapa 1 con $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	62
Gráfico 52-3. Método (FWO) etapa 2 con $\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$	62

Gráfico 53-3. Método (FWO) etapa 3 con $\beta=15$ °C/min	63
Gráfico 54-3. Método (FWO) etapa 4 con $\beta=15$ °C/min	63
Gráfico 55-3. Método de Kissinger etapa 1 con $\beta=5$ °C/min	65
Gráfico 56-3. Método de Kissinger etapa 2 con $\beta=5$ °C/min	65
Gráfico 57-3. Método de Kissinger etapa 3 con $\beta=5$ °C/min	66
Gráfico 58-3. Método de Kissinger etapa 4 con $\beta=5$ °C/min	66
Gráfico 59-3. Método de Kissinger etapa 1 con $\beta=15$ °C/min	67
Gráfico 60-3. Método de Kissinger etapa 2 con $\beta=15$ °C/min	67
Gráfico 61-3. Método de Kissinger etapa 3 con $\beta=15$ °C/min	68
Gráfico 62-3. Método de Kissinger etapa 4 con $\beta=15$ °C/min	68
Gráfico 63-3. Representación de $d\alpha/dt$ vs el Grado de avance (α)	70

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. Estudio termogravimétrico para $\beta=5$ °C/min

ANEXO B. Estudio termogravimétrico para $\beta=15$ °C/min

ANEXO C. Datos cinéticos obtenidos del estudio termogravimétrico

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

TGA:	Análisis Termogravimétrico
k:	Constante cinética de la reacción (s^{-1})
R:	Constante universal de los gases (KJ/mol °K)
Ea:	Energía de Activación (KJ/mol)
A:	Factor pre exponencial (s^{-1})
α :	Grado de avance de reacción
Phum:	Peso de muestra húmeda
Ps:	Peso de muestra seca
% CF:	Porcentaje de carbono fijo (%)
% Cn :	Porcentaje de cenizas (%)
% W :	Porcentaje de humedad (%)
PCS:	Poder calorífico superior (MJ/Kg)
β :	Tasa de calentamiento (°K/s)
DTG:	Termogravimétrico Diferencial
TG:	Termogravimétrico

RESUMEN

En el presente proyecto de investigación se estudió la cinética del proceso termogravimétrico de degradación del látex natural (*Hevea Brasiliensis*), analizando el cambio de masa en función del tiempo. En primer lugar, se caracterizó la biomasa mediante espectroscopia infrarroja (FTIR), análisis inmediato y cálculo de poder calorífico, dicha caracterización muestra las bandas características del látex natural, principalmente el grupo funcional del poliisopreno comprendido en el rango entre 839,847 y 1646,91 1/cm, además el porcentaje de compuestos volátiles fue del 82, 39% y un poder calorífico 29,88 MJ/kg lo cual muestra la viabilidad del estudio, luego, se realizó el estudio termogravimétrico en un equipo Mettler Toledo TGA-1 considerando tasas de calentamiento de 5 y 15 °C/min. Utilizando los datos del estudio termogravimétrico y con la aplicación de la ecuación de Arrhenius se proponen cinco modelos cinéticos (Determinación de orden por ampliación de Avrami, Coast-Redfern, Friedman, Flynn-Wall-Ozawa y Kissinger). Finalmente se estableció al modelo cinético basado en el método de Kissinger como modelo adecuado para la degradación térmica del látex natural y con el fin de minimizar el error entre el valor experimental y calculado, se propone un nuevo modelo y se ajustaron los parámetros cinéticos como la energía de activación y el factor pre exponencial. Mediante el uso de software Statgraphics, se realizó un recalcu de las temperaturas de trabajo lo cual mostró parámetros cinéticos más ajustados como la energía de activación de 180,967 KJ/mol, en el pico más alto de 363,33°C y un factor pre exponencial de 16,428 1/s. Así mismo, se obtuvo una energía de activación de 176,836 KJ/mol, en el pico más alto de 379°C y un factor pre exponencial de 16,467 1/s, para las dos tasas de calentamiento.

Palabras clave: <TERMOGRAVIMETRIA> <TASA DE CALENTAMIENTO> <MODELO CINETICO> <LATEX NATURAL> <PIRÓLISIS> <BIOPOLIMERO> <DEGRADACION TERMICA> <ECUACION DE ARRHENIUS>

LUIS ALBERTO
CAMINOS
VARGAS

Firmado digitalmente por LUIS
ALBERTO CAMINOS VARGAS
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, I=RIOBAMBA,
serialNumber=0602766974,
cn=LUIS ALBERTO CAMINOS
VARGAS
Fecha: 2021.03.15 16:12:42 -05'00'



0762-DBRAI-UPT-2021

SUMMARY

The objective of this study was to study the kinetics of the thermogravimetric process of degradation of natural latex (*Hevea Brasiliensis*), analysing the change in mass as a function of time. In the first place, the biomass was characterized by infrared spectroscopy (FTIR), immediate analysis and calculation of calorific value, this characterization shows the characteristic bands of natural latex, mainly the functional group of polyisoprenes comprised in the range between 839.847 and 1646.91 1/cm. Also, the percentage of volatile compounds was 82,39% and a calorific value of 29,88 MJ / kg, which shows the feasibility of the study, then the thermogravimetric study was carried out in a Mettler Toledo TGA-1 equipment considering heating rates of 5 and 15 °C/min. Using the data from the thermogravimetric study and applying the Arrhenius equation, five kinetic models are proposed (Determination of order by amplification of Avrami, Coast-Redfern, Friedman, Flynn-Wall-Ozawa, and Kissinger). Finally, the kinetic model based on the Kissinger method was established as an adequate model for the thermal degradation of natural latex and to minimize the error between the experimental and calculated values, a new model is proposed, and the kinetic parameters were adjusted such as the activation energy and the pre-exponential factor. Through the use of Statgraphics software, a recalculation of the working temperatures was carried out which showed more adjusted kinetic parameters such as the activation energy of 180,967 KJ/mol, in the highest peak of 363,33 °C and a pre-exponential factor from 16,428 1/s. In the same way, the activation energy of 176,836 KJ/mol was obtained, at the highest peak of 379 °C and a pre-exponential factor of 16,467 1/s, for the two heating rates.

Keywords: <THERMOGRAVIMETRY> <HEATING RATE> <KINETIC MODEL>
<NATURAL LATEX> <PYROLYSIS> <BIOPOLYMER> <THERMAL DEGRADATION>
<ARRHENIUS EQUATION>

INTRODUCCIÓN

La producción y desarrollo de combustibles y nuevos materiales de origen biológico resulta ser una herramienta de gran importancia para la sustitución progresiva de productos derivados del petróleo (Ahmad et al., 2016, p. 3), a la vez, los impactos ambientales relacionados con la emisión de gases de efecto invernadero se reducen significativamente lo que nos hace soñar con un desarrollo sustentable de la nación.

Ecuador es un país dotado de diversos climas que permiten el cultivo y desarrollo de muchas especies vegetales, siendo el punto de partida para el desarrollo de investigaciones centradas en dar un valor agregado e impulsar la siembra de árboles de la especie *Hevea Brasiliensis* como alternativa de reforestación ya que se considera poco exigente al árbol de látex natural debido a que se adapta fácilmente en suelos donde la baja fertilidad no es conveniente para otros cultivos además de que puede soportar drásticas caídas de temperatura nocturna que rodea los 15°C en el territorio subtropical (GAD CALUMA, 2019, p. 19).

El relieve superficial del cantón Caluma es propicio para el cultivo y desarrollo de esta especie de planta por sus condiciones climáticas, en este contexto existe un beneficio económico que obtienen los propietarios de grandes extensiones de tierra. También existe el beneficio ambiental en cuanto a la utilización como cultivo asociado en zonas ganaderas cuya producción ha aumentado significativamente en los últimos años ya que provee sombra para los animales, así como también la reforestación en zonas montañosas donde existe la presencia de vertientes de agua limpia, garantizando así la prolongación de la vida útil de las captaciones en las reservas y una mejor calidad de vida a la población (GAD CALUMA, 2019, p. 22).

En la naturaleza la especie *Hevea Brasiliensis* es una de las principales fuentes de obtención de látex natural conocido como cis-1,4-poliisopreno (Ahmad et al., 2016, p. 3), el cual ha tenido importancia significativa en el diario vivir de las personas, está presente en la mayoría de productos de uso cotidiano. Este biopolímero está compuesto principalmente por poliisopreno asociado con varios compuestos bilógicos, los subproductos que se pueden obtener de este material tienen la capacidad de biodegradarse fácilmente en procesos de compostaje en un corto periodo de tiempo a diferencia de los productos derivados del petróleo que tiene un largo periodo de latencia hasta su descomposición (Pinheiro, 2015, p. 16).

Este trabajo tiene como principal objetivo analizar la viabilidad de valorizar las plantaciones de árbol de *Hevea Brasiliensis*, cuya sangría pueda reemplazar a los productos derivados del petróleo e incluso la posible obtención de un combustible de tercera generación (Ahmad et al., 2018, p. 3), partiendo de un estudio termogravimétrico, obteniendo constantes cinéticas que permitan definir las características en procesos de transformación industrial (Samsuri & Abdullahi, 2017, p. 3).

El análisis termogravimétrico TGA es una técnica analítica que se usa para el análisis de diversos tipos de materiales principalmente polímeros, con esta herramienta se puede caracterizar la degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) (cantidad y velocidad de pérdida de peso), estabilidad térmica y el comportamiento de vida media de estos materiales poliméricos (Fiaco, 2011, p. 18). El TGA aporta información valiosa sobre la estabilidad térmica del material, así precisar un rango de temperatura óptimo de utilización (Medeiros et al., 2010, p. 2).

Los modelos cinéticos que parten de un estudio termogravimétrico proporciona datos valiosos acerca del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) (Raza et al., 2018, p. 5), mediante los cuales se puede valorizar a la biomasa como materia prima química precursora de un sinnúmero de nuevos materiales y combustibles a través de diversos procesos industriales que puedan dar lugar a la generación de empleos en el sector.

Partiendo de bases investigativas realizados por otros autores es pertinente mencionar que la temperatura de degradación del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) oscila entre los 300 y 500 °C de acuerdo con Lah et al. (2013, p. 3), mediante procesos de pirolisis de esta biomasa se puede obtener valiosos hidrocarburos como: gas hidrogeno, metano y eteno mismos que pueden representar potenciales combustibles de tercera generación (Yang et al., 2020, p. 3), por esta razón se propone un estudio cinético dividido por etapas mediante la aplicación de modelos matemáticos basados en la ecuación de Arrhenius.

Planteamiento del problema

El árbol de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) es procedente de la cuenca sur del Amazonas, corresponde a la familia de euforbiaceae y subfamilia crotonidae (Rodríguez, 2009, p. 11). El caucho o látex natural es muy utilizado, las personas lo usan a lo largo de toda su vida; en cosméticos, en los alimentos, chupones en los biberones, forma parte en neumáticos para vehículos y entre otros miles de artículos que utilizamos en nuestra vida diaria (Ahmad et al., 2016, p. 5). El creciente desarrollo de nuevos usos industriales y aplicativos del látex natural, han convertido a esta materia prima en una oportunidad para la generación de nuevos productos derivados.

El látex natural en el Ecuador como en el resto del mundo tiene una alta demanda debido a la gran cantidad de productos derivados que parte de este. El caucho seco o látex natural seco es el producto más valioso dentro del mercado ecuatoriano. La producción anual de 3000 toneladas de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) cosechado en 8349 hectáreas no logra satisfacer la demanda nacional, llegando a necesitarse aproximadamente 10505 toneladas (Rodríguez, 2009, p. 20).

Las condiciones óptimas de adaptabilidad del árbol de látex natural son temperaturas entre 20 y 30 °C y una altitud inferior a 1300 msnm (Rodríguez, 2009, p. 12). La especie *Hevea Brasiliensis* puede soportar fácilmente caídas de temperatura nocturna hasta 15 °C. Estas condiciones han hecho de Caluma un lugar propicio para el crecimiento o desarrollo de este árbol mismo que en la localidad ocupa una extensión de 21,30 hectáreas cuyas potencialidades no han sido aprovechadas de forma industrial ni tampoco en el campo investigativo (GAD CALUMA, 2019, pp. 22-23).

La industria de los plásticos derivados del petróleo desde su desarrollo comercial e industrial ha permitido el crecimiento en los niveles económicos de muchos países desarrollados y en vías de desarrollo, por ser un material de bajo costo en cuanto en temas de producción. El uso excesivo de este material ha causado una alarma mundial en términos de contaminación de suelos, mares y demás hábitat terrestres que representan la deposición final de estos residuos

La principal problemática en la localidad es la no existencia de una base investigativa que provea datos referenciales acerca de las propiedades y comportamiento del látex natural frente a diferentes condiciones de temperatura y presión, mismas que son de vital importancia tanto para el desarrollo en innovación dentro del campo industrial, de esta manera el cantón Caluma no figura entre los cantones del Ecuador donde se desarrollen este tipo de trabajos investigativos que fortalezcan de alguna manera en la economía del sector.

El no conocimiento de la cinética química de los recursos agrícolas, impide realizar propuestas o llevar a cabo las mismas para un posible diseño de una planta generadora de energía limpia que parten del uso de biomasa que se encuentra en la localidad en abundancia.

Justificación del proyecto

El látex natural resulta ser una de las materias primas de algunos productos, debido a que su sangría posee características que reemplazan al caucho sintético, lo que pone en evidencia la necesidad de llevar a cabo un estudio enfocado a la “EVALUACIÓN DE MODELOS CINÉTICOS UTILIZADOS EN EL PROCESO TERMOGRAVIMÉTRICO DE LA DEGRADACIÓN DEL LÁTEX NATURAL (*Hevea brasiliensis*) EN EL CANTÓN CALUMA”.

La misma investigación tiene el propósito fundamental de generar herramientas científicas que permitan el desarrollo de nuevos productos derivados del látex natural, como es el caso de biocombustibles de tercera generación, cuya fundamentación radica en la determinación de la cinética de degradación que mejor se ajuste al comportamiento del látex natural frente a diferentes intervalos de temperatura y tiempo de permanencia, lo cual instaura un paso fundamental para la implementación o desarrollo de un potencial diseño y construcción de una planta generadora de biocombustibles amigables con el ambiente, fortaleciendo el desarrollo en investigación e innovación en el cantón Caluma.

El desarrollo de este trabajo investigativo proporcionara bases importantes para que el cantón Caluma se enfoque en el desarrollo de nuevos combustibles y búsqueda de nuevos materiales mostrando un panorama atractivo para la industria e inversionistas cuyo enfoque sea las energías limpias.

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Evaluar modelos cinéticos para la degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*).

Objetivos específicos

- Caracterizar la muestra de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) mediante pruebas físico-químicas.
- Realizar análisis termogravimétricos de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) considerando diferentes tasas de calentamiento.
- Determinar parámetros cinéticos mediante cálculos matemáticos en los diferentes modelos asociados con la degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*).
- Establecer el modelo cinético adecuado para la degradación del látex natural (*Hevea Brasiliensis*).

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Antecedentes de la investigación

El látex natural ha sido ampliamente utilizado a lo largo de la historia en varios productos derivados de uso diario, es por ello que se ve la necesidad de un estudio cinético en procesos termogravimétricos asociados con este polímero y contrastados con trabajos previamente realizados, debido a que constituye una base científica para la obtención de nuevos materiales derivados del látex natural que sustituyan a los productos y subproductos del petróleo e incluso la obtención de un combustible de tercera generación siendo una pauta muy importante que permita conocer al investigador los beneficios e inconvenientes de este tipo de estudio ya que servirá como punto de partida de la presente investigación, cabe resaltar que a nivel local y nacional existen pocos estudios cinéticos relacionados directamente con el látex natural, por lo cual se tomara como apoyo aquellos que aporten la mayor cantidad de información.

En el estudio realizado por Cáceres & Gauthier (2012, p. 8) se detalla la importancia de la composición del látex natural para la determinación del contenido de sólidos totales (CST) y contenido de caucho seco (CCS) por termogravimetría como un método más sencillo en comparación con otros métodos utilizados. Los cuales resultan tediosos y demanda de largos periodos de tiempo cuyos resultados fueron comparados con los obtenidos en los métodos señalados en la norma ASTM D1076 lográndose finalmente un método de caracterización viable con una varianza entre los dos métodos de 0,45 mg para los valores obtenidos de CST y una varianza entre los dos métodos de 0,13 mg para el CCS comparado con los valores obtenidos en las condiciones dadas por la norma.

Según Fiacco (2011, p. 142) en su proyecto presenta la utilización de cuatro modelos cinéticos que describen la degradación de algunos polímeros basados en lignina mediante análisis termogravimétricos, considerando seis velocidades de calentamiento, donde se observó que los modelos cinéticos de Friedman y Coast-Redfern presentaron mayor similitud en cuanto los resultados de energía de activación (E_a) a diferentes velocidades de calentamiento.

Por otra parte Yang et al., (2020, p. 1) en su estudio presenta resultados de dinámica molecular de mecanismos de generación de productos de pirólisis y caminos óptimos con experimentos de caucho natural (NR), caucho estireno-butadieno (SBR) y cauchos mixtos (NR-SBR) para la

recuperación eficaz de caucho de desecho. Según muestra la Figura 1-1 los principales productos obtenidos de los tres experimentos (NR, SBR, NR-SBR) son: gas hidrogeno (H_2), Metano (CH_4) y Eteno ($CH_2 = CH_2$).

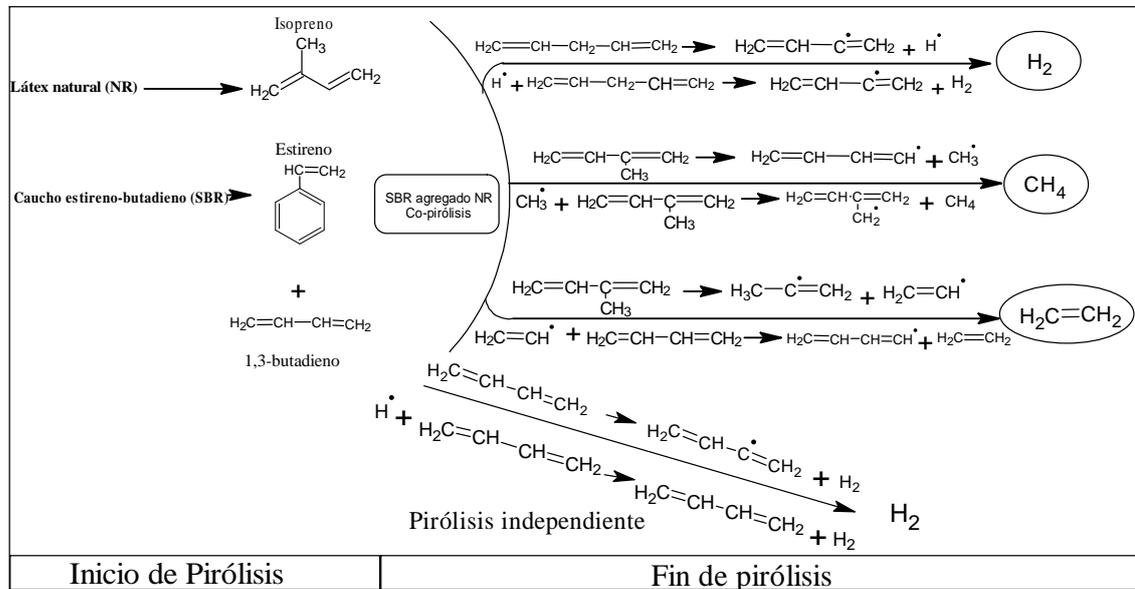


Figura 1-1. Productos gaseosos durante la co-pirólisis.

Fuente: Yang et al., 2020.

1.2 Bases conceptuales

1.2.1 Problemática

Teniendo como antecedente la persistencia y un costoso tratamiento de los residuos de caucho derivados del petróleo (Ahmad et al., 2016, p. 2), se buscan nuevas alternativas sostenibles que sustituyan a estos polímeros, generando así una alta demanda de estudios científicos relacionados con el tema en cuestión.

Nuestro país es productor de grandes cantidades de biomasa de los cuales se puede obtener suficiente materia prima orgánica para producir energía limpia y renovable. Según ARCONEL (2017, p. 45) menciona que en el año 2017 la biomasa representó el 1,54% del total de producción de energía limpia a nivel nacional, con productos como el arroz, banano, cacao, café, caña de azúcar, palma africana, entre otros, pero no menciona el potencial que posee el látex natural del cual se obtiene gran cantidad de residuos aprovechables en el ámbito energético, pues posee una gran cantidad de material celulósico aprovechable.

1.2.2 Látex natural (*Hevea Brasiliensis*)

Según Ahmad et al. (2016, p. 3) las estadísticas del año 2015 muestran que la producción mundial de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) casi se ha duplicado en comparación al año 2000, el consumo mundial de látex natural fue de 12,1 millones de toneladas métricas en 2015. Por otra parte Santi (2014, p. 21) afirma que los principales productores son Tailandia (29,8 %), Indonesia (22.5%) y Malasia (19,2%), siendo el 71.5% de la producción mundial, el 28.5% restante es proveniente de países como China, Liberia, Nigeria, Costa de Marfil, India, Siria, Lanka, Filipinas, Vietnam, Camboya, Camerún, Brasil y Guatemala. América latina contribuye con aproximadamente con 1% del total de producción mundial de látex natural.

La superficie cultivada de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) en el Ecuador según Santi (2014, p. 21) es de aproximadamente 4942 hectáreas, de las que 4415 se encuentran en producción, mientras que Fierro (2016, p. 27) sostiene que alrededor de 4600 toneladas de látex natural produce el país, cuando la demanda del producto es superior a las 12700 toneladas. A su vez Caluma un lugar propicio para el crecimiento o desarrollo de este árbol mismo que en la localidad ocupa una extensión de 21,30 hectáreas cuyas potencialidades no han sido aprovechadas de forma industrial ni tampoco en el campo investigativo (GAD CALUMA, 2019, p. 23). Se evidencia el alto alcance que tienen los cultivos del cantón para la economía local, provincial y nacional.

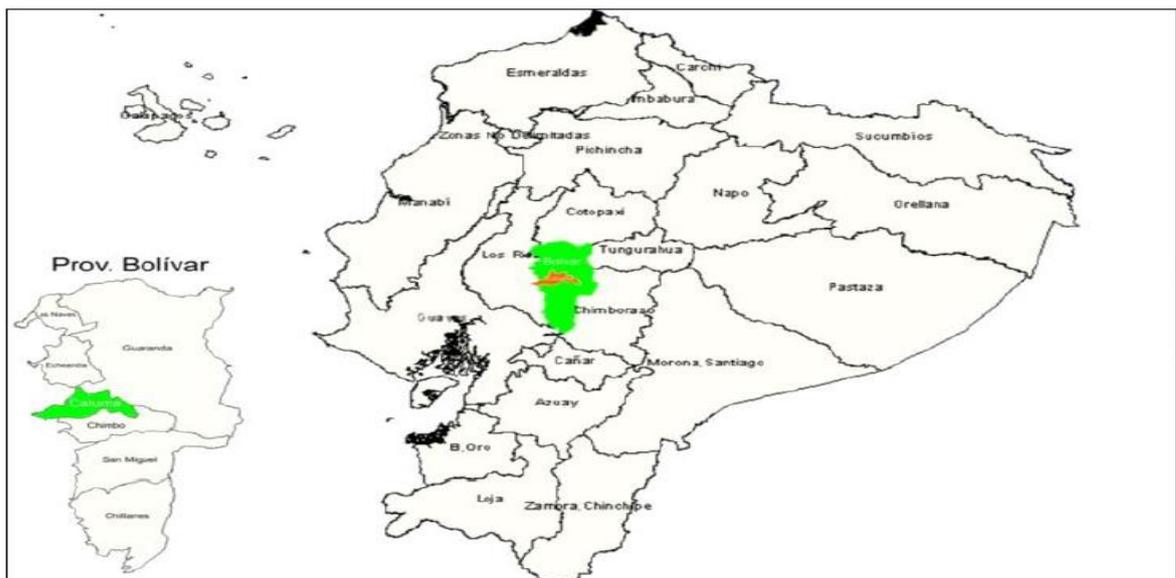


Figura 2-1. Ubicación del cantón Caluma en el contexto nacional.

Fuente: GAD CALUMA, 2019

1.2.3 Tipos de látex natural

Los diferentes tipos de látex natural que se producen en la actualidad incluyen tableros acanalados ahumadas, especificación técnica de caucho, crepés, etc. De los principales países productores, se considera a Tailandia como principal proveedor de tableros acanalados ahumadas, con un aproximado de la mitad de la producción mundial de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) (Santi, 2014, p. 35). El látex natural conocido como de especificación técnica se evalúa de acuerdo a su calidad, especialmente su pureza y elasticidad, se determina mediante especificaciones técnicas, en lugar de especificaciones de apariencia convencionales. También se lo llama látex natural en bloque, el cual fue introducido en Malasia a mediados de la década de 1960 y en ese entonces representaba aproximadamente el 40-45 % de la producción de látex natural, siendo Indonesia, Malasia y Tailandia los principales proveedores de este tipo de látex (Santi, 2014, p. 35).

En la actualidad existen varios autores que afirman que se pueden identificar algunas diferencias en las propiedades físico-químicas del látex natural, esto se debe al tipo o variedad de la especie, clima, frecuencia de sangrado, entre otros factores (Zapata & Álvarez, 2017, p. 1). En los últimos años ha crecido la demanda mundial del látex de caucho natural, debido a que los productos derivados sirven como protección frente al virus del sida y a otros agentes patógenos transmitidos por la sangre, además que los concentrados de látex natural se utilizan para la producción de pegamentos, tejidos de fondo de alfombras, espumas y productos como globos, guantes y preservativos, etc. (Santi, 2014, p. 35). Según Zapata & Álvarez (2017, p. 4) en Colombia, las especies más propagadas han sido los clones RRIM 600, IAN 710, IAN 873 y FX 3864.



Figura 3-1. Látex natural (*Hevea Brasiliensis*) puro.

Fuente: Peña Elvis, 2021

1.2.4 Características

Las variedades se diferencian en su estabilidad térmica por parte de los Ácidos Grasos Volátiles (AGV), proteínas y agua. De acuerdo con Zapata & Álvarez (2017, pp. 2-3) la mayor estabilidad térmica de los Ácidos Grasos Volátiles, proteínas y caucho la presenta la variedad FX 3864, mientras que el IAN 873 tiene la menor estabilidad. De igual manera, el contenido de residuo orgánico del FX3864, es el doble al que presentan el IAN 873.

Tabla 1-1. Composición del látex natural.

CONSTITUYENTE	% EN PESO
Agua	52-70
Hidrocarburo de látex natural	27-40
Prótidos	1,5-2,8
Sustancias solubles en acetona:	
Resinas	1,0-1,7
Azucares	0,5-1,5
Materias minerales	0,2-0,9

Fuente: Cáceres & Gauthier, 2012

Realizado por: Peña Elvis, 2021

La fase acuosa del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) en su gran mayoría contiene agua, además de otras especies químicas diferentes, entre las que están los carbohidratos, electrolitos, proteínas y aminoácidos. En el momento en que el látex no es correctamente preservado, los carbohidratos, junto con los ácidos grasos saturados y los aminoácidos son usados como sustratos por microorganismos para producir ácidos grasos volátiles como el fórmico, acético y propiónico, que generan una acción perjudicial sobre la estabilidad del coloide (Cáceres & Gauthier, 2012, p. 6).

Tabla 2-1. Propiedades físicas de ciertos componentes del látex natural.

Sustancias	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)
AGV	Ácido fórmico	100,7
	Ácido acético	118,2
	Ácido propiónico	141,4
Azucares	Galactosa	166
	Sacarosa	160
	Glucosa	110
	Fructosa	95
Lípidos	Ácido oleico	232
	Acido esteárico	160
	Acido butírico	163
	Acido palmítico	139

Minerales	Potasio	63,53	759
	Sodio	97,87	883
	Magnesio	650	1090
	calcio	842	1527
	Hierro	1535	2750

Fuente: Cáceres & Gauthier, 2012

Realizado por: Peña Elvis, 2021

1.2.5 Biomasa de látex natural como Potencial Combustible Energético.

La biomasa del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) está compuesto principalmente de poliisopreno hidrocarbonado y puede proporcionar energía mediante su transformación en materiales sólidos, líquidos y gaseosos. Los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos (térmicos y eléctricos) se denominan biocombustibles (Ahmad et al., 2016, p. 1).

Ante la crisis de la energética global de los combustibles fósiles, y amenazas del calentamiento global, se espera que el alto consumo y el agotamiento de los combustibles fósiles provoquen un aumento excesivo de sus precios en las próximas décadas (Ahmad et al., 2018, p. 5). El empleo de la biomasa de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) como fuente de energía que aporta una serie de posibles ventajas, como el balance positivo de CO₂ y de energía, la utilidad de suelos anteriormente no productivos, reducción de riesgos de incendios forestales y de plagas de insectos, creación de empleo rural o las mejoras en la balanza de pagos de los países con déficit en energía (Lah et al., 2013; Ahmad et al., 2019).

1.2.6 Propiedades de la biomasa

La capacidad energética de la biomasa del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) está contenida en el Poder Calorífico Superior o High Heating Value (HHV), esta propiedad determina la energía disponible en la biomasa y está relacionada directamente con el contenido de humedad (Meza & De laTorre, 2015, p. 1). Se expresa como el contenido energético liberado por un material cuando este es quemado en aire. El Poder Calorífico se puede expresar como el calor desprendido por un kilogramo de biomasa forestal, su valor se mide en la bomba calorimétrica. La combustión se realiza a volumen constante y el agua de combustión se recoge de forma líquida. Su valor depende de la humedad contenida en la muestra (Espinoza, 2020, p. 29).

En el presente trabajo de investigación se opta por calcular el poder calorífico a partir del análisis inmediato de la muestra de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) (Zhang et al., 2019, p. 3), a su vez se utilizan los datos proporcionados por el análisis TGA. En la Tabla 3-1 se observan los valores de poder caloríficos de ciertos combustibles con la finalidad de establecer una similitud con los valores reportados para biomasa. En la Tabla 4-1 se detallan varios ejemplos de biomasa con sus

respectivos poderes caloríficos en donde se afirma que la capacidad energética aumenta cuando la biomasa está seca, debido que no se pierde energía en la evaporación del agua (Tyng et al., 2020; Mallick et al., 2018; Huang et al., 2016; Espinoza, 2020).

Tabla 3-1. Poder calorífico de algunos combustibles.

Combustible	Poder Calórico Superior (MJ/kg)
Gas Natural	44.00
Gasolina	45.89
Biodiesel	38.50
GLP	53.00
Carbón	33.70

Fuente: Espinoza, 2020

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Tabla 4-1. Poder calorífico de la biomasa

Biomasa	Poder Calórico Inferior (MJ/kg)
Bagazo de caña de azúcar	10.50
Bagazo de cebada	19.20
Cáscara de Cacahuete	17.80
Cascara de arroz	13.80
Cosetas de caña	4.60
Madera seca	19.00
Madera verde	14.40
Paja seca de trigo	12.50
Paja toquilla	13.40
Aserrín de laurel	8.40
Viruta seca	13.40
	Poder Calórico Superior (MJ/kg)
Cáscara de almendras	16.80
Cáscara de nueces	22.00
Cáscara de arroz	15.30
Cáscara de semilla de girasol	17.50
Cáscara de trigo	15.80
Corteza de Pino	22.40
Racimo de palma	21.93
Orujillo de aceituna	17.90
Orujo de uva	17.12
Cáscara de naranja	18.34
Papel	16.50

Fuente: Espinoza, 2020

Realizado por: Peña Elvis, 2021

1.2.7 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico, es una técnica que nos permite, a partir de curvas termogravimétricas conocer los parámetros que caracterizan los procesos de degradación del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) (Rojek et al., 2018, p. 8). Los datos proporcionados por el análisis TGA son también el punto de partida para la predicción de parámetros cinéticos con inteligencia artificial a través de redes neuronales artificiales, permitiendo así la disminución significativa de errores, pero hay que tener en cuenta una serie de consideraciones en la realización de ensayos, puesto que debido a la naturaleza de la técnica, se pueden obtener señales distintas como consecuencia de fenómenos de absorción, desorción o evaporación de componentes volátiles, además de otros componentes ajenos que pueden estar presentes en la muestra, en función de las condiciones de la muestra o del programa utilizado (Mayol et al., 2018; Mitie & Yu, 2010; Straszko et al., 2008). Los parámetros en consideración serían los siguientes: La velocidad de calentamiento, tipo de atmosfera, caudal del gas empleado, geometría y tamaño de la muestra. Muchos estudios han demostrado la necesidad de controlar los parámetros para obtener resultados reproducibles y asimilables al comportamiento real de los materiales (Chen et al., 2016; Fiaco, 2011; Fernández-Berridi et al., 2006).

1.2.8 Análisis Inmediato de la biomasa.

El análisis inmediato proporciona información acerca de los materiales de los que está compuesta la muestra de látex natural (*Hevea Brasiliensis*). Este análisis permite determinar el contenido de humedad, materia volátil, carbón fijo y cenizas expresados en porcentaje en peso, y definir la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbón fijo) y la fracción inerte (humedad y cenizas) (Ahmad et al., 2018, p. 4).

La Figura 4-1 muestra cómo se pueden identificar cada uno de estos componentes del análisis inmediato, partiendo de datos obtenidos en el análisis termogravimétrico.

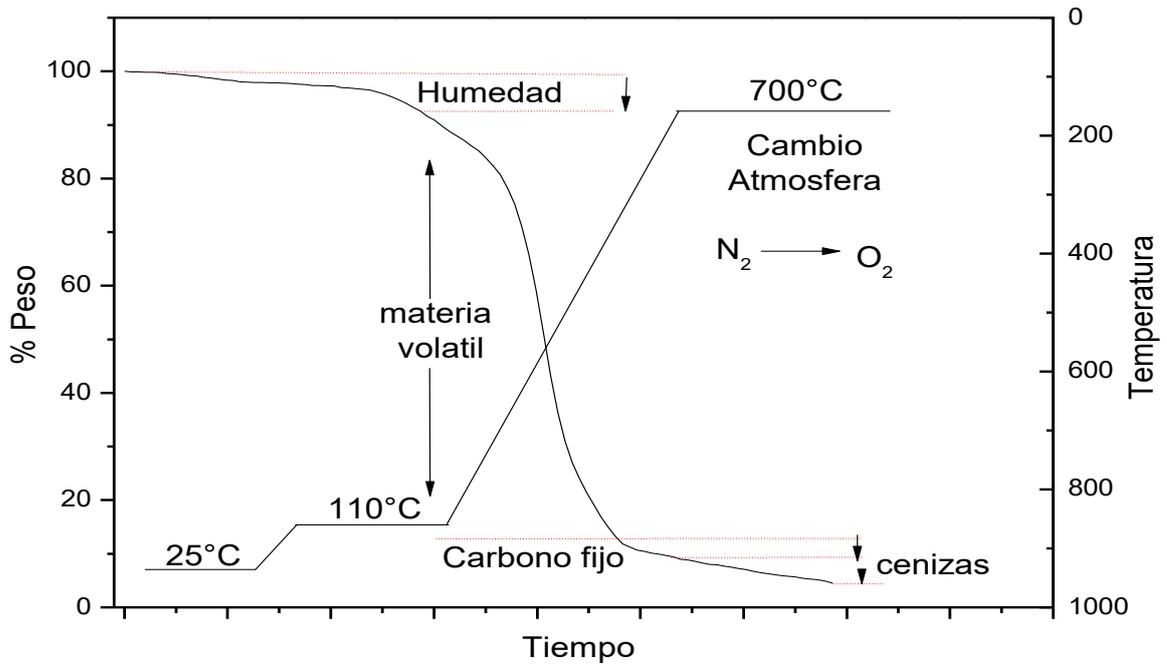


Figura 4-1. Curva termogravimétrica para el análisis inmediato.

Fuente: Espinoza, 2020

1.2.8.1 Humedad

Se define a la humedad como la cantidad de agua que contiene una muestra de látex natural (*Hevea Brasiliensis*), para procesos que involucran conversión, este valor no debe ser superior al 30% (Chen et al., 2016, p. 6). Se calcula mediante la ecuación:

$$\%Hum = \frac{Phu - Ps}{Phu} \times 100$$

Donde:

$\%Hum$ = Porcentaje de humedad.

Phu =Peso de la muestra húmeda.

Pse = Peso de la muestra seca.

1.2.8.2 Cenizas

Considerada la cantidad de material solido no combustible, se conoce como residuo inorgánico después de la combustión total del carbono fijo (Moreno et al., 2003, p. 4). Se calcula con:

$$\%Cn = \frac{Pcn}{Pim} \times 100$$

Donde:

$\%Cn$ = Porcentaje de cenizas

Pcn = Peso de cenizas (mg)

Pim = Peso inicial de la muestra (mg)

1.2.8.3 *Compuestos volátiles*

Cantidad de combustible o material químico de interés que es liberado en forma de algunos hidrocarburos mediante descomposición térmica de la muestra de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) (Meza & De la Torre, 2015, p. 4). Se calcula con:

$$\%M.V = \%C - \%Hum$$

$$\%C = \frac{D - E}{D} * 100$$

Donde:

$\%M.V$ = Porcentaje de Materia Volátil

$\%C$ = Pérdida de peso

$\%Hum$ = Porcentaje de Humedad

D = Peso de la muestra (mg)

E = Peso de la muestra después del calentamiento (mg)

1.2.8.4 *Carbono fijo*

Tiene lugar luego de la eliminación del material volátil, y se considera como la cantidad de masa que funciona como combustible (Peng et al., 2011, p. 3). Se calcula con:

$$\%C.F = 100 - (\%Hum + \%Cn + \%M.V)$$

Donde:

$\%C.F$ = Porcentaje de carbono fijo

$\%Hum$ = Porcentaje de Humedad

$\%Cn$ = Porcentaje de cenizas

$\%M.V$ = Porcentaje de Materia Volátil

1.2.9 *Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)*

La espectroscopia infrarroja se fundamenta en la absorción o emisión de energía radiante que se origina por la interacción entre la radiación electromagnética y el material de estudio, Cáceres & Gauthier (2012, p. 6) en su trabajo afirma que la fase dispersa del látex natural (*Hevea*

Brasiliensis) está conformada en su mayoría de cis-isopreno (86%p), además de pequeñas cantidades de sustancias proteicas (1%p), lipoides (3%p) y agua (10%p). Para un estudio completo es necesario analizar varias bandas para poder demostrar la presencia del hidrocarburo poliisopreno el cual es el principal producto de interés (Fernández-Berridi et al., 2006, p. 4).

1.2.10 Generación de energía a partir del látex natural

El hombre aprendió a generar energía desde el principio de los tiempos a partir de diferentes tipos de biomasa (particularmente de la madera seca) mediante su combustión directa. Sin embargo, con el paso de tiempo descubrió otras formas de convertir la biomasa en energía, las cuales se basan en la generación de combustibles, algunos pensadores demostraron que el látex natural (*Hevea Brasiliensis*) posee pequeñas cantidades de azufre y a la vez alto contenido de carbono e hidrógeno, lo que lo convierte en una fuente potencial para la síntesis de productos químicos y combustibles (Mitie & Yu, 2010; Ahmad et al., 2016).

1.2.11 Generación de nuevos productos a partir del Látex natural

Los biopolímeros de látex además de sus usos en formulaciones de pinturas, adhesivos, aglutinantes, revestimientos de papel, acabados textiles y farmacéuticos, encuentran aplicaciones más diversas a través de nuevas combinaciones de materiales como los impregnados de nanocompósitos de fibras naturales como la especie *Hevea Brasiliensis* (Pinheiro, 2015, p. 58).

1.2.12 Modelos cinéticos

El modelo global de un solo paso asume que el fenómeno de desvolatilización procede como una reacción única, la tasa de conversión del estado sólido al producto volátil se describe mediante la siguiente reacción (Tyng et al., 2020, p. 7).



Dónde los volátiles representan la suma del gas y el biocombustible, y las cenizas es el restante solido sin reaccionar (Mallick et al., 2018, p. 2). La siguiente expresión describe la tasa de transformación del estado sólido a volátiles:

$$\frac{d\alpha}{dt} = K(T) \cdot f(\alpha)$$

Donde:

α : grado de avance de la reacción.

t: tiempo de reacción.

K(T): constante de reacción.

F(α): función que representa el modelo de reacción.

El grado de conversión, α , se calcula como su pérdida de peso relativa de la siguiente manera

(Tamri et al., 2018, p. 8):

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_f}$$

Donde:

m_0 : masa inicial.

m_t : masa en el tiempo t.

m_f : masa residual final

La constante de reacción K, depende de la temperatura y obedece a la ecuación fundamental de Arrhenius (Mayol et al., 2018, p. 2):

$$K = A \cdot e^{\frac{-Ea}{RT}}$$

Donde:

A: factor preexponencial (s^{-1})

Ea: energía de activación aparente ($\frac{KJ}{mol}$)

T: temperatura absoluta ($^{\circ}K$)

R: constante universal de los gases ($8,314 \frac{J}{mol \cdot ^{\circ}K}$)

Por otra parte, existen métodos no isotérmicos en los que se emplean velocidades de calentamiento (β), generalmente lineal, para elevar la temperatura.

$$T = T_0 + \beta t$$

$$\beta = \frac{dT}{dt}$$

Donde:

T_0 : tiempo inicial

β : tasa de calentamiento constante ($\frac{^{\circ}K}{s}$)

T: temperatura a tiempo t.

Si sustituimos las ecuaciones anteriores obtenemos.

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \cdot f(\alpha)$$

Esta ecuación representa la forma diferencial de la ley de velocidad no isotérmica (Fermoso & Mašek, 2018, p. 9).

Para calcular los parámetros cinéticos de la degradación del látex natural (*Hevea Brasiliensis*), que requieren un conjunto de pruebas experimentales en diferentes velocidades de calentamiento, estos métodos son (Tyng et al., 2020, p. 7):

1.2.12.1 Determinación de orden por ampliación de la teoría de Avrami

El método para la determinación de orden de reacción, consiste en la utilización de la ampliación de la teoría de Avrami representada por la siguiente expresión (Medeiros et al., 2009, p. 2):

$$\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - \alpha)) = \text{Ln}A - \frac{E_a}{RT} - n\text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)$$

Donde:

E_a : energía de activación aparente para un grado de conversión α .

T_α : temperatura de reacción a la que se alcanza este grado de conversión α .

n : se representa como la pendiente de la línea recta trazando, $\text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)$, versus $\text{Ln}(-\text{Ln}(1 - \alpha))$ (Medeiros et al., 2009, p. 3).

1.2.12.2 Método de Kissinger

Este método permite obtener los parámetros cinéticos de una reacción en estado sólido sin necesidad de conocer el mecanismo de reacción, este modelo se desarrolló un modelo libre con el método no isotérmico donde la energía de activación (E_a) no es necesario que se calcule en cada valor de conversión para evaluar los parámetros cinéticos (Mallick et al., 2018, p. 3).

$$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \text{Ln}\left(\frac{A \cdot R}{E_a}\right) - \left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)$$

Según Mallick et al. (2018, p. 3) respecto a la curva termogravimétrica diferencial (DTG), la temperatura a la que se produce la máxima velocidad de pérdida de peso $\left(\frac{\alpha}{s}\right)$ dada para una velocidad de calentamiento está determinada por el factor preexponencial (A) y la energía de

activación (E_a). Por lo tanto, al representar gráficamente $\ln\left(\frac{\beta}{T^2}\right)$ versus $\left(\frac{1}{T}\right)$, se obtendrá una línea recta de pendiente $\left(\frac{-E_a}{R}\right)$.

1.2.12.3 Método de Flynn-Wall-Ozawa (FWO)

El método FWO es uno de los métodos más utilizados para el cálculo de parámetros cinéticos, permite que la energía de activación aparente se obtenga para cada grado de conversión de la ecuación.

$$\ln(\beta) = \ln\left(\frac{A_\alpha \cdot E_{a_\alpha}}{R \cdot g(\alpha)}\right) - 5.331 - 1.052 \frac{E_{a_\alpha}}{R \cdot T_\alpha}$$

Donde:

E_{a_α} : energía de activación aparente para un grado fijo de conversión α .

T_α : temperatura de reacción a la que se alcanza este grado de conversión α .

E_{a_α} se calcula a partir de la pendiente de la línea recta obtenida trazando el logaritmo de la tasa de calentamiento, $\ln(\beta)$, versus $\left(\frac{1}{T_\alpha}\right)$ (Fermoso & Mašek, 2018; Tyng et al., 2020; Medeiros et al., 2010).

1.2.12.4 Método de Friedman

Este modelo asume que $f(\alpha)$ permanece constante. Además, que la degradación es independiente de la temperatura y solo depende de la tasa de pérdida de masa.

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = \ln\left[\beta\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)\right] = \ln[Af(\alpha)] - \frac{E_a}{RT}$$

E_a : se calcula a partir de la pendiente de la línea recta obtenida trazando, $\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ versus $\left(\frac{1}{T}\right)$, cuya pendiente es $\left(-\frac{E_a}{R}\right)$ (Tyng et al., 2020; Fiaco, 2011; Çepelioğullar et al., 2018).

1.2.12.5 Método de Coast-Redfern (C-R)

Según Peng et al. (2011, p. 3) este modelo propone un método para la determinación de parámetros cinéticos de procesos de degradación a partir de técnicas termogravimétricas mediante la integración de las expresiones generales que rigen la cinética de reacción.

$$\ln\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{A \cdot R}{\beta \cdot E_a}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{2 \cdot R \cdot T}{E_a}\right)\right] - \left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)$$

La expresión propuesta sugiere que la representación de $\ln\left(\frac{\alpha}{T^2}\right)$, versus $\left(\frac{1}{T}\right)$, dará una línea recta de pendiente $\left(-\frac{E_a}{R}\right)$ (Fiaco, 2011; Straszko et al., 2008).

Tabla 5-1. Funciones para la determinación del orden de reacción

ORDEN	f(a)	F(a)
0	1	a
1	1 - a	-Ln(1 - a)
n	(1 - a) ⁿ	$\frac{[1 - (1 - a)^{1-n}]}{1 - n}$

Fuente: Peng et al., 2011; Straszko et al., 2008

Realizado por: Peña Elvis, 2021.

1.3 Avances del estudio cinético del látex natural (*Hevea Brasiliensis*)

La cinética de degradación térmica del látex natural se ha estudiado extensamente con el análisis termogravimétrico (TGA), la representación de curvas termogravimétricas (TG) y derivada termogravimétrica (DTG) son esenciales para comprender el mecanismo de pirólisis a través de la resolución del modelo cinético y los parámetros basados en datos de pérdida de peso (Liu et al., 2018, p. 4). La degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) ha sido investigado por varios autores, donde se han aplicado diferentes modelos cinéticos para correlacionar datos experimentales de variación de peso obtenidos a diferentes tasas de calentamiento.

De acuerdo con Liu et al. (2018, p. 13), en su estudio realizado acerca de la pirolisis de distintos tipos de cauchos incluido el látex natural en condición de ambiente inerte y una tasa de calentamiento de 10 °C/min, se tomó en cuenta la etapa de pirolisis del látex natural comprendido en el rango de temperatura de 300-470 °C, la energía de activación (Ea) y factor pre exponencial (A) fueron calculados por el modelo de Coast-Redfern, reportando valores de 187,76 $\left(\frac{KJ}{mol}\right)$ y 33,58 (s^{-1}), además se reporta el orden de reacción n=1,72 con una correlación de 0,9909 lo que evidencia la precisión del método utilizado.

Por otra parte Tamri et al. (2018, p. 14) expone algunos parámetros que afectan al procesos de degradación del látex natural para la producción de valiosos hidrocarburos, se asume que el combustible es sólido por lo que la pirolisis es una reacción de primer orden, los parámetros cinéticos como la energía de activación (Ea) y factor pre exponencial (A) se determinó mediante un método integral para las tasas de calentamiento de 5, 15, 30,45 y 90 °C/min. Los resultados obtenidos indican que la energía de activación disminuye de 171,06 a 136,62 $\left(\frac{KJ}{mol}\right)$ conforme se aumente la tasa de calentamiento de 5 a 90 °C/min, además el tiempo de residencia disminuye

también con el aumento de β . Los parámetros cinéticos se calcularon en el rango de $\alpha=10-90\%$ de grado de avance, el cual representa la principal región de pirólisis.

De igual forma Wei et al. (2019, p. 4) expone algunos mecanismos de generación de gas de pirólisis de látex natural utilizando una simulaciones de dinámica molecular de reacción (RMD), el trabajo se desarrolla a una tasa de calentamiento de $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ asumiendo que la pirólisis es una reacción de un solo paso que empieza a degradarse a aproximadamente $326\text{ }^{\circ}\text{C}$ y no existe cambio significativo de masa a $460\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual indica que la pirolisis de isopreno culmina en este punto. Los resultados obtenidos a partir del empleo de software para la simulación del proceso de pirólisis son olefinas de moléculas grandes, así como también cadenas cortas de cinco átomos de carbono (C_5H_8) con energía de activación de $278,4\left(\frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)$, además de otros hidrocarburos de menor peso molecular que tienen lugar a su formación más fácilmente (Wei et al., 2019, p. 10).

Según Wang & Zhao (2015, p. 1) la pirólisis de guantes de goma es una solución sostenible para la gestión de residuos hospitalarios, los guantes de goma son de consumo necesario en el área de la salud y cuya composición más común es la modificación química del látex natural para prevenir el envejecimiento prematuro del material. La cinética de los guantes de goma se estudió a diferentes tasas de calentamiento ($5, 10, 20$ y 40) $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ desde 100 a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ en atmósfera de nitrógeno, se utilizan tres métodos isoconversionales de los cuales es de interés el método de Kissinger y el método de Flynn-Wall-Ozawa (FWO), los resultados muestran que la energía de activación aparente se incrementa con el grado de avance en un punto máximo de $\alpha = 70\%$ para ambos casos, la energía de activación aparente es de $181,82\left(\frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)$ en el primer caso y $134,3\left(\frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)$ en el segundo, además de una correlación de $0,99875$ y $0,99898$ respectivamente (Wang & Zhao, 2015, p. 6).

El análisis térmico se utiliza entre otras cosas para evaluar la durabilidad y predicción de la vida útil de un producto, según Hayeemasae et al. (2019, p. 4) en su estudio de cinética y estabilidad térmica del látex natural relleno con nanopartículas de dióxido de titanio (TiO_2), se establece que la estabilidad térmica del látex natural mejora con la adición de nanopartículas de dióxido de titanio, el estudio cinético se realizó en condiciones de atmósfera de nitrógeno a una tasa de calentamiento de $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ en un rango de temperatura de 30 a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, el método utilizado fue Coast-Redfern para la etapa de degradación polimérica comprendida en $330-450\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el caso del látex natural sin adición de TiO_2 involucró una energía de activación de $89,57\left(\frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)$, además de que conforme aumenta la cantidad de nanopartículas de TiO_2 aumenta la energía de activación hasta un máximo de $109,10\left(\frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)$, esto confirma que la muestra tiene una mayor estabilidad térmica debido a que se necesita una mayor cantidad de energía para descomponer el material.

CAPÍTULO II

2 MARCO METODOLÓGICO

2.1 Tipo y diseño de investigación

2.1.1 Tipo de investigación

Esta investigación es de tipo experimental porque se enfoca en la investigación, análisis e interpretación de los datos obtenidos, que luego se emplearan en la realización de cálculos de ingeniería como punto de partida en estudios de dimensionamiento de reactores.

- **Método experimental:** Este método requiere la intervención de elementos tecnológicos e instrumentos específicos que faciliten la obtención de valores empíricos al momento de realizar los ensayos de caracterización del producto o la materia prima, con el único objetivo de corroborar que dichos elementos se encuentren dentro de rangos aceptables contrastados con bibliografía. Con este método se facilita el diseño del procedimiento que se va a seguir para obtener el producto final con los parámetros preestablecidos deseados.

2.1.2 Diseño de la investigación

El diseño experimental de este estudio se desarrolló con el propósito de determinación de los parámetros cinéticos en el proceso de degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*). El proceso se llevará a cabo en tres etapas, la primera etapa es caracterizar la muestra obtenida de látex natural mediante espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), análisis inmediato y cálculo de poder calorífico. La segunda etapa corresponde al análisis termogravimétrico de la muestra de látex natural a tasas de calentamiento de 5 y 15 °C/min, para la determinación de parámetros térmicos y variación de masa. Finalmente, en la última etapa cuando se haya determinado parámetros cinéticos se procederá a la interpretación del coeficiente de correlación lineal en cada una de las etapas y se procederá a la validación y establecimiento del modelo adecuado para el proceso de degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*).

2.2 Unidad de Análisis

Para la presente investigación la unidad de análisis es el látex natural (*Hevea Brasiliensis*), del cual se tomarán dos muestras de aproximadamente 15 y 20 mg látex natural para su posterior caracterización y estudio termogravimétrico.

2.3 Población de estudio

La población de estudio constituirá las muestras de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) obtenidos en el cantón Caluma, provincia de Bolívar, a partir de pequeñas cantidades de cultivos en las localidades adjuntas al cantón.

2.4 Tamaño de muestra

Para realizar la experimentación que permita realizar el estudio cinético se trabajará bajo tratamientos con muestras no mayores a 25 gramos de látex natural obtenido en el cantón Caluma, con el fin de obtener resultados más precisos. Del total de la población se escogerá por un muestreo aleatorio simple. Los estudios se realizarán con una tasa de calentamiento de 5 (°C/min) y 15 (°C/min) con un rango de temperatura de 25-600°C.

2.5 Selección de muestra

a) Obtención del látex natural (*Hevea Brasiliensis*)

Para la presente investigación la biomasa seleccionada fue de látex natural (*Hevea Brasiliensis*), obtenida en el cantón Caluma, la cual representa una cantidad de muestra importante para el desarrollo de pruebas termogravimétricas.

La muestra de látex natural deberá ser almacenada en bolsas herméticas y mantenido a temperaturas óptimas para evitar su descomposición.

b) Secado de la muestra

El látex natural (*Hevea Brasiliensis*), deberá pasar por un proceso de secado de tal forma que se precisen las condiciones ideales que faciliten el desarrollo de la prueba termogravimétrica.

c) Adecuación del látex natural (*Hevea Brasiliensis*)

Para la caracterización del látex natural (*Hevea Brasiliensis*), el material debe tener un porcentaje de humedad bajo, para ello se debe efectuar ensayos que permitan la reducción de humedad.

d) Condiciones de análisis

Los análisis son realizados con distintas tasas de calentamiento de 5 y 15 (°C/min), debido a que la temperatura de degradación del látex natural es aproximadamente 300-450 °C, se asume que el proceso es una pirolisis lenta por lo que la tasa de calentamiento también será mínima principalmente para la biomasa, además de que debido a la baja energía suministrada se puede controlar la selectividad de las reacciones (Liu et al., 2018, p. 16). Una temperatura de inicio entre 25°C para detectar la presencia humedad en la muestra. La temperatura final es 600°C para sustancias orgánicas, puede utilizarse gases como nitrógeno, helio o argón para

crear una atmosfera inerte para minimizar el efecto del oxígeno en el proceso de degradación térmica.

2.6 Identificación de variables

- Variable Independiente:

Temperatura, Composición elemental, volatilidad, contenido de humedad, contenido de cenizas, tasa de calentamiento y cantidad de muestra.

- Variable Dependiente

Energía de Activación, factor preexponencial de la ecuación cinética, orden de reacción, constante cinética, variación de masa y tiempo de residencia.

2.7 Técnicas de recolección de datos

2.7.1 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

El análisis FTIR se usa con el fin de determinar la estructura molecular de la muestra, esto incluye a los grupos funcionales de sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el látex natural (*Hevea Brasiliensis*).

Tabla 1-2. Determinación del espectro FTIR del látex natural (*Hevea Brasiliensis*)

DETERMINACIÓN DEL ESPECTRO FTIR DEL LÁTEX NATURAL (<i>Hevea Brasiliensis</i>)	
Materiales	Reactivos
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Piceta ➤ Tela absorbente ➤ Espectro fotómetro infrarrojo FTIR 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Muestra de látex natural (<i>Hevea Brasiliensis</i>) ➤ Agua destilada
Procedimiento	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Encender el dispositivo presionando el interruptor “on”. ➤ Ejecutar el software Spectra Manager en el computador conectado al dispositivo de análisis para iniciar el escaneo. ➤ Realizar la limpieza Con agua destilada y la tela absorbente en el área de análisis donde se colocará la muestra. ➤ Ejecutar el barrido espectral colocando la muestra en el área destinada para la misma, ajustar el tornillo de ajuste hasta que evidencie fricción, cerrar la compuerta y presionar “start”. ➤ Procesar el espectro en el computador, identificar y etiquetar los picos más pronunciados para la lectura e interpretación. 	

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Generar el archivo dl espectro y posteriormente guardarlo con formato del mismo programa o formato de un procesador de texto ➤ Cerrar todos los programas del ordenador y apagar el dispositivo presionando “off”
Cálculos
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los resultados del análisis de la muestra se reportan de forma cualitativa (Espectrograma) y cuantitativa (Transmitancia y numero de onda de grupos funcionales)

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Fuente: Facultad de ciencias. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2021

2.7.2 *Análisis inmediato*

Tabla 2-2. Obtención de parámetros del análisis inmediato

DETERMINACIÓN DEL ANÁLISIS INMEDIATO
Procedimiento
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Registrar los datos proporcionados por el análisis termogravimétrico y ordenarlos en un procesador de datos. ➤ Definir formulas empíricas para el cálculo del porcentaje de humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas ➤ Realizar los cálculos y representar en una gráfica las etapas correspondientes a cada porcentaje obtenido
Cálculos
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los resultados cuantitativos deben reportar el porcentaje de cada elemento del análisis inmediato

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

2.7.3 *Análisis termogravimétrico TGA*

Se empleó el equipo METTLER TOLEDO-TGA 1 para el análisis termogravimétrico, el cual puede analizar pequeñas cantidades de muestra con una precisión de $\pm 0,001$ mg. Este análisis lo realizo la Facultad de Ingeniería Química, área de investigación de la Universidad Central del Ecuador.

De acuerdo con Fiaco (2011, p. 45), el procedimiento estándar con el que se debe realizar el análisis termogravimétrico se muestra a continuación:

- Encendido del equipo y programación de las condiciones de operación como tasa de calentamiento (5 y 15 °C/min), atmosfera inerte y rango de temperatura (25-600 °C).
- Colocar la muestra pesada (16-20 mg) en el crisol previamente encerado e introducir en el horno del equipo
- Ejecutar el software de análisis en el ordenador e iniciar el análisis.

- Exportar los resultados y los termogramas para su posterior interpretación y análisis.

2.7.3.1 Modelos cinéticos

Los datos proporcionados por el análisis termogravimétrico permitirá que se adapten modelos matemáticos basados en la ecuación de Arrhenius, con el fin de establecer parámetros cinéticos como energía de activación y factor pre exponencial que describan de forma correcta la degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*). Los métodos utilizados se verán representados por la forma de la ecuación general de la recta:

$$y = a + bx$$

La representación gráfica de métodos de análisis permitirá conocer la pendiente y el intercepto de la ecuación, mismos que servirán para el cálculo de dichos parámetros cinéticos. El coeficiente de correlación (R^2) permitirá conocer el modelo cinético que se ajuste mejor al proceso de degradación térmica del látex natural, través de los resultados se establece parámetros cinéticos ideales más ajustados con el fin de realizar un análisis estadístico. En el presente trabajo se usa los siguientes métodos:

- Método para la determinación de orden por ampliación de la expresión de Avrami
- Método de Coast-Redfern
- Método de Friedman
- Método de Flynn-Wall-Ozawa
- Método de Kissinger

CAPÍTULO III

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Caracterización físico-química del látex natural (*Hevea Brasiliensis*).

3.1.1 Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier permite conocer los principales grupos funcionales presentes en la muestra a ser analizada (Hapuarachchi et al., 2016, p. 2).

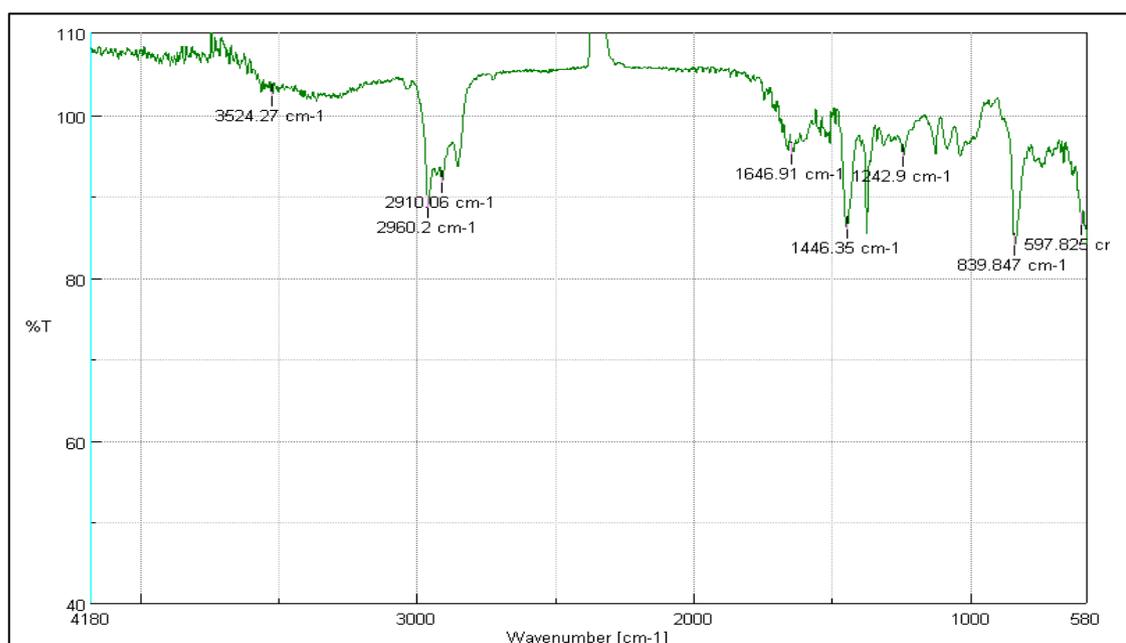


Gráfico 1-3. Análisis FTIR del látex natural (*Hevea Brasiliensis*)

Fuente: Facultad de ciencias. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2021

En el gráfico 1-3 se muestra el resultado del análisis realizado a la muestra de látex natural (*Hevea Brasiliensis*), en el cual se puede observar el espectro de absorción de energía radiante característico de este biopolímero se encuentra en 839,847 y 1646,91 (cm^{-1}), esto se debe al estiramiento del doble enlace $C = C$ del isopreno, principal compuesto de interés presente el látex natural (*Hevea Brasiliensis*), por lo que se afirma que los datos obtenidos de la muestra son coherentes con otras investigaciones acerca del látex natural según la tabla 1-3.

Tabla 1-3. Identificación de grupos funcionales en la muestra

Autor	Número de onda [cm-1]	%Transmitancia	Grupo funcional
Peña, Elvis, 2021	839,847-1646,91	83,9935-95,1605	Cis-1,4-Poliisopreno
Cáceres & Gauthier, 2012	837,05-1647,10	82,5-97,5	
Wei et al., 2019	836-1650	90-98	
Ahmad et al., 2019	816-953	80,3-97,12	
Hapuarachchi et al., 2016	833-1645	90-98	

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Los demás picos observados en el gráfico 1-3 corresponden a sustancias proteicas, además de una pequeña cantidad de agua que se identifica en $3524,27 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$, pico característico debido al estiramiento del enlace O-H, los enlaces covalentes C-H se evidencian en las bandas $2960,2\text{-}2910,06 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ señalado por Ahmad et al. (2019, p. 7), además el isopreno se encuentra en la región de $839,847 \text{ y } 1646,91 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ valor muy cercano al reportado por Cáceres & Gauthier (2012, p. 5), esto se debe al estiramiento del doble enlace $C = C$. Finalmente el enlace C-C se ubica en $1446,35 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$, el movimiento de flexión de $-CH_2$ cuyo pico esta figurado en el rango de $597,825 \text{ y } 839,847 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ de acuerdo con Fernández-Berridi et al. (2006, p. 5).

3.1.2 Análisis inmediato de la biomasa del látex natural (*Hevea Brasiliensis*).

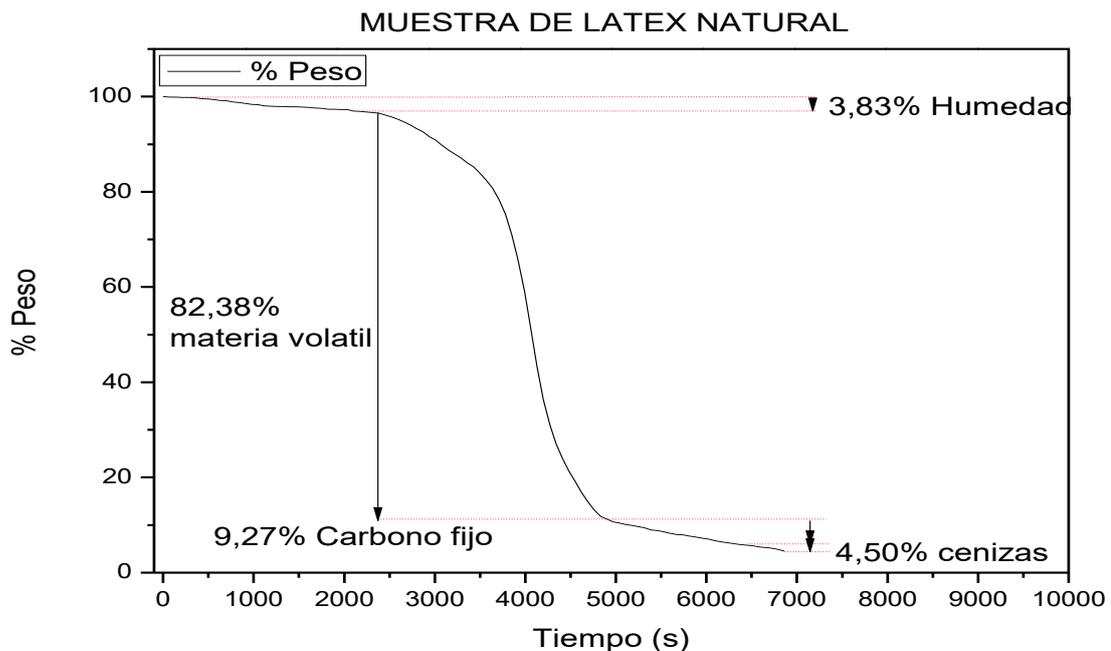


Gráfico 2-3. Representación de los resultados del análisis inmediato

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Algunos autores como Xing et al. (2019, p. 15) y Hosseinpour et al. (2017, p. 20) afirman que el estudio termogravimétrico proporciona las herramientas necesarias para la determinación de datos de análisis inmediato apoyado en la figura 4-1, en dichas investigaciones se propuso estimar el poder calorífico superior mediante el análisis inmediato aplicando correlaciones empíricas iterativas e inteligencia artificial.

Tabla 2-3. Resultados del análisis inmediato

Análisis inmediato					
	Autor	Humedad (%)	Cenizas(%)	Volátiles(%)	Carbono fijo (%)
Látex Natural (<i>Hevea Brasiliensis</i>)	Peña, Elvis, 2021	3,83	4,51	82,39	9,27
	Wang & Zhao, 2015	0,52	19,33	69,16	10,99
	Wei et al., 2019	1,2	5,08	86,17	8,55
	Ahmad et al., 2019	1,71	3,68	84,97	8,72
	Ahmad et al., 2018	1,71	3,60	83,98	8,71

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Los resultados obtenidos en la tabla 2-3 acerca del análisis inmediato de la muestra de látex natral (*Hevea Brasiliensis*), se detalla que el contenido de material volátil es superior al 80% como lo señala Ahmad et al. (2018, p. 4), la cantidad de humedad es precisa y la desviación de los valores propuestos por Wang & Zhao (2015, p. 2) se debe al tratamiento térmico (105 °C por 24h.) de secado previo al análisis, los procesos de conversión energética se necesita que no alcance un valor por arriba del 30%. Finalmente, el contenido de carbono fijo y cenizas es similar a los valores reportados por otros autores, cabe recalcar que el contenido de cenizas es menor al 5% por lo que el látex natural es un material versátil propicio para la obtención de biocombustibles y otros materiales derivados.

3.1.3 Poder calorífico superior HHV (High Heating Value)

Tabla 3-3. Resultados del cálculo del poder calorífico

Autor	Ecuación empírica	Poder calorífico (MJ/Kg)
Hosseinpour et al., 2017	$-0.03Cn - 0.11Hu + 0.33MV + 0.35CF$	29,877

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Partiendo de los datos de análisis inmediato reportados en la tabla 3-3 se planteó el uso de una ecuación empírica para el cálculo del poder calorífico superior (HHV) del látex natural (*Hevea Brasiliensis*), cuyos resultados se muestran en la tabla 3-3, en la que se obtuvo un valor de $29,8763 \frac{MJ}{Kg}$, este valor es muy próximo al reportado por Wang & Zhao (2015, p. 2) definido en $30,32 \frac{MJ}{Kg}$, esto se debe a que la cantidad de material volátil es relativamente alta lo cual permite

que el poder calorífico superior sea elevado, a su vez se expresa que el método de cálculo es válido. En base a estos resultados se afirma que el látex natural es una de las fuentes prometedoras de energía alternativa y se puede emplear para resolver problemas de crisis energética, en comparación con la biomasa convencional (Soh et al., 2019, p. 5), que reporta valores de poder calorífico menores a los obtenidos en este trabajo.

3.1.4 Análisis termogravimétrico

3.1.4.1 Obtención de datos para modelos cinéticos

En los gráficos 3-3 y 4-3 se observa las curvas obtenidas después de haberse realizado el análisis termogravimétrico para las muestras de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) en condiciones de atmosfera inerte y tasas de calentamiento de 5 °C/min (Grafico 3-3) y 15 °C/min (Grafico 4-3). Además, se puede diferenciar dos curvas en cada caso: la línea de color negro corresponde a la curva experimental, mientras que la línea color naranja corresponde a la derivada de la misma.

- Rampa 1: $5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

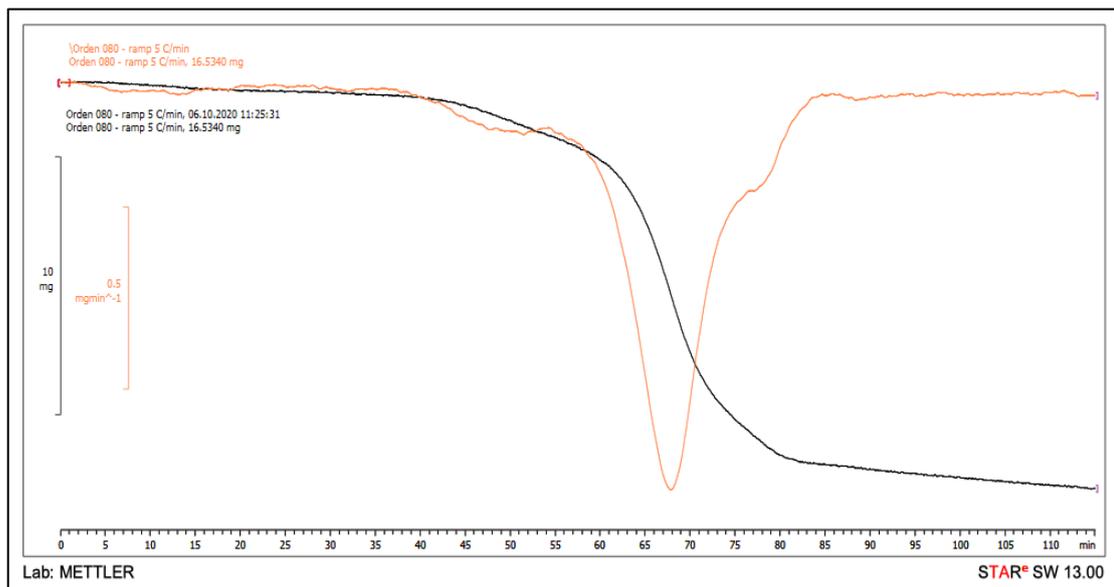


Gráfico 3-3. Análisis TGA: $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Fuente: Facultad de Ingeniería Química. Universidad Central del Ecuador, 2021

- Rampa 2: $15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

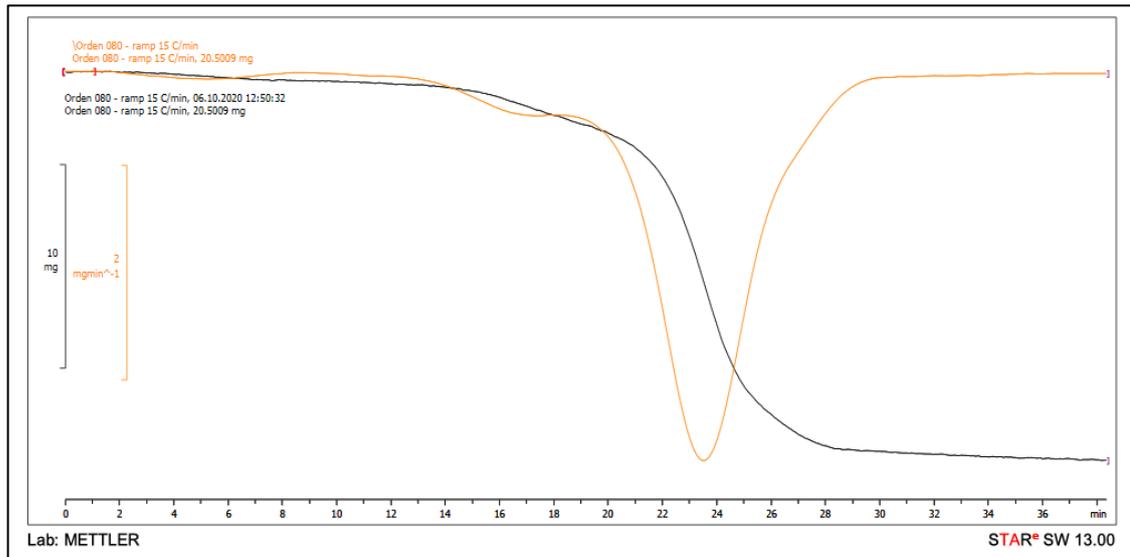


Gráfico 4-3. Análisis TGA: $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Fuente: Facultad de Ingeniería Química. Universidad Central del Ecuador, 2021

Para la comprensión correcta del análisis termogravimétrico (TGA) se partirá de los datos presentados en el (ANEXO C), los cuales permiten analizar a detalle cada una de las etapas, representando la curva Conversión (α) vs Tiempo

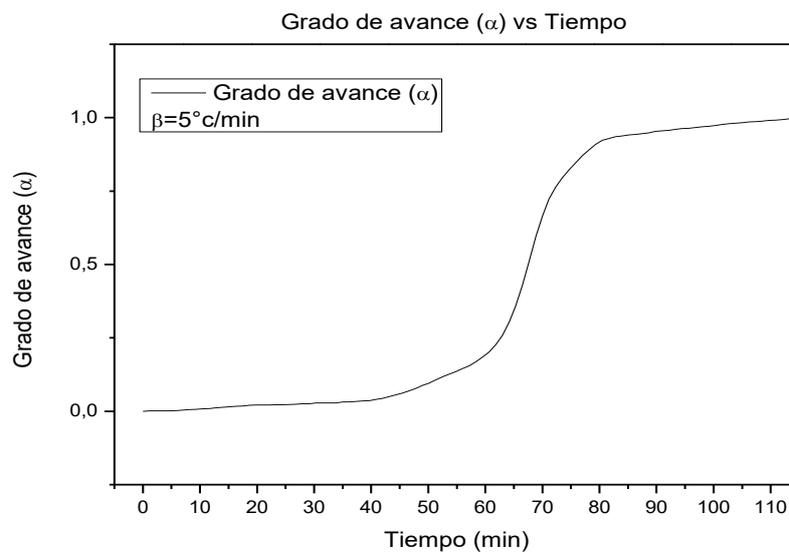


Gráfico 5-3. Grado de avance en función del tiempo $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

El gráfico 5-3 muestra la curva de grado de avance en función de tiempo para el látex natural (*Hevea Brasiliensis*) a una tasa de calentamiento baja de 5 °C/min, se asume que la pirolisis será lenta, lo que se entiende que el tiempo de residencia de la muestra es más prolongado (Liu et al., 2018, p. 19), además se observa que en el intervalo de 20 a 95 min se presenta el mayor grado de avance el cual se debe a la pirolisis del material volátil que coincide con la mayor pérdida de peso. Dado que el suministro de energía es bajo la selectividad de las reacciones son controlables cosa que no ocurre con el aumento de la tasa de calentamiento

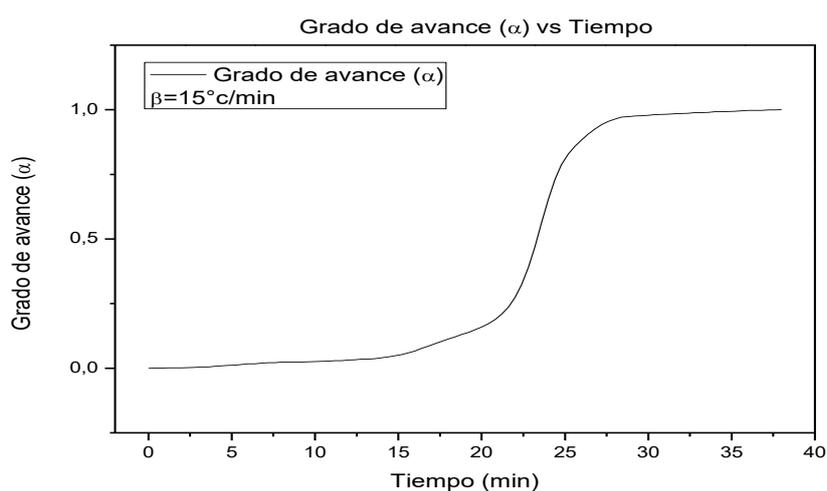


Gráfico 6-3. Grado de avance en función del tiempo $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Por otra parte Tamri et al. (2018, p. 17), afirma que si se modifica las condiciones de operación se verá afectado también el proceso de degradación del látex natural (*Hevea Brasiliensis*), esto se evidencia en el gráfico 6-3 el que presenta la curva de grado de avance en función del tiempo para la tasa de calentamiento 15 °C/min donde el intervalo de tiempo en el que se presenta mayor grado de avance es de 5 a 35 min, es decir que conforme aumenta la tasa de calentamiento β, el tiempo de residencia global disminuye considerablemente.

3.1.5 Cálculo del modelo cinético

Para una mejor percepción de la degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*) se ha propuesto realizar el estudio dividido en cuatro etapas de acuerdo a intervalos de temperatura debido a que las curvas DTG sugieren que existen intervalos de pérdida de peso, estas etapas se identifican a conveniencia, pero apoyados en la revisión de literatura.

De acuerdo con Hayemasae et al. (2019, p. 4), en los termogramas se observan diferentes etapas de pérdida de peso, la etapa inicial alrededor de 180-200 °C se asoció a la materia volátil presente en la muestra, la etapa principal de degradación se considera en 330-450 °C y finalmente por sobre los 450 °C se considera la etapa de formación de ceniza.

Tabla 4-3. Intervalos de temperatura por etapas

Etapa	Intervalo (°C)	Intervalo (°C)
	$\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$	$\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$
1. <i>Humedad</i>	48,333-124,167	49-127
2. <i>Materia volátil</i>	223,333-305,0	229-313
3. <i>Pirolisis del isopreno</i>	310,833-421,667	319-433
4. <i>Cenizas</i>	462,50-590,833	475-595

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Otros autores como Mitie & Yu (2010, p. 2) afirman que el proceso de pirolisis de la biomasa debe ser considerado en cuatro etapas conforme se registra la pérdida de peso, dado que no se considera los intervalos de temperatura inicial se propuso la inclusión de una etapa inicial correspondiente a la pérdida de peso debido a la humedad de la muestra cómo se presenta en la tabla 4-3.

3.1.5.1 Determinación de orden de reacción

Para la determinación del orden de reacción o exponente de Ozawa (n), se utilizó la ampliación de la teoría de Avrami en condiciones no isotérmicas presentada en Medeiros et al. (2009, p. 2), partiendo de la expresión siguiente:

$$\ln(-\ln(1 - \alpha)) = \ln A - \frac{E_a}{RT} - n \ln\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)$$

Esta expresión puede ser representado por la ecuación general de la recta, la representación gráfica proporcionara el intercepto con el que se obtiene el factor pre exponencial y la pendiente dará como resultado el orden de reacción (n) (Moreno et al., 2003, p. 5).

$$y = a + bx$$

Donde:

$$y = \ln(-\ln(1 - \alpha))$$

$$a = \ln(A) - \frac{E_a}{RT}$$

$$x = \ln\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) \text{ y } b = n$$

- Rampa 1: $5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Etapa 1:

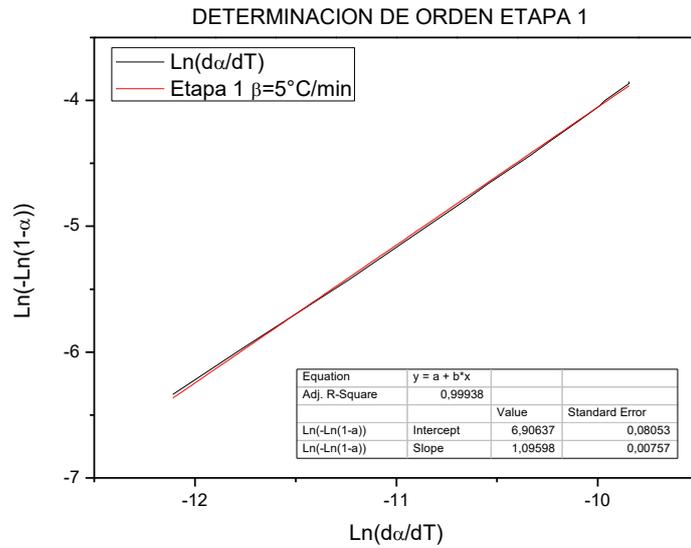


Gráfico 7-3. Determinación de orden etapa 1 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

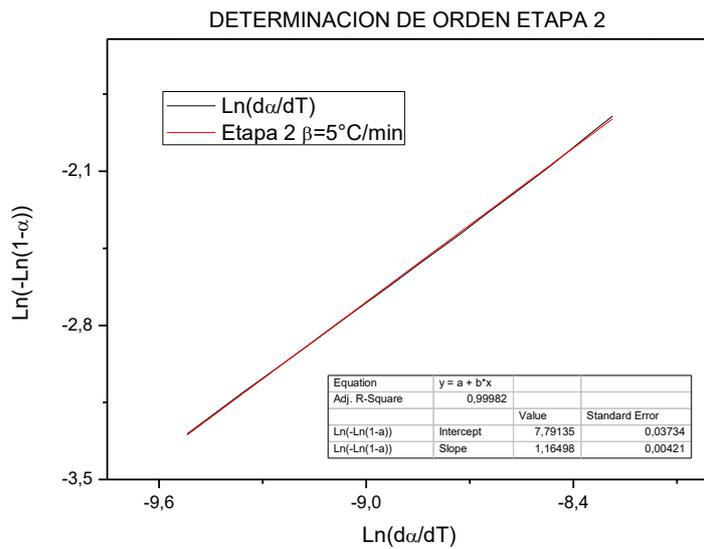


Gráfico 8-3. Determinación de orden etapa 2 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

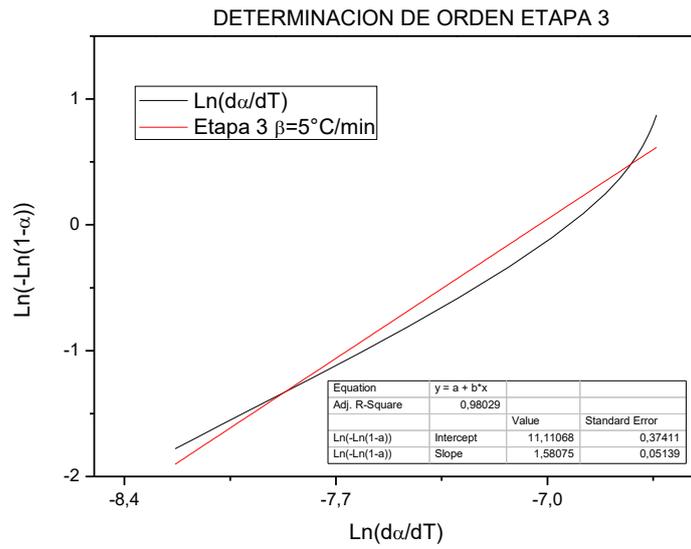


Gráfico 9-3. Determinación de orden etapa 3 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

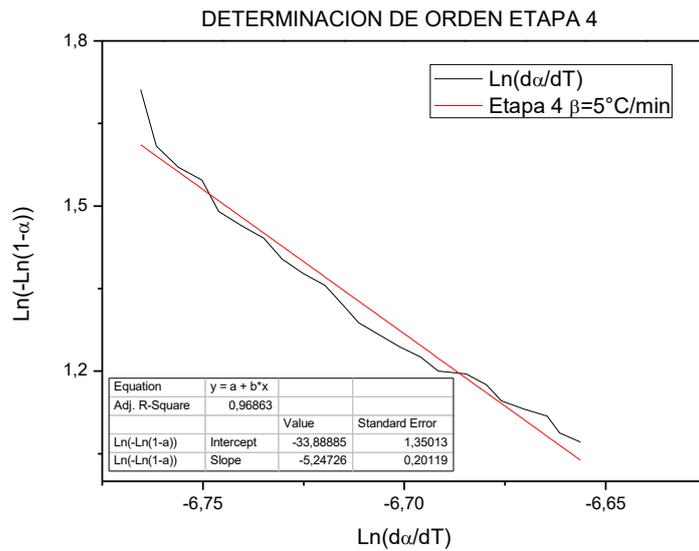


Gráfico 10-3. Determinación de orden etapa 4 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

- Rampa 2: $15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Etapa 1:

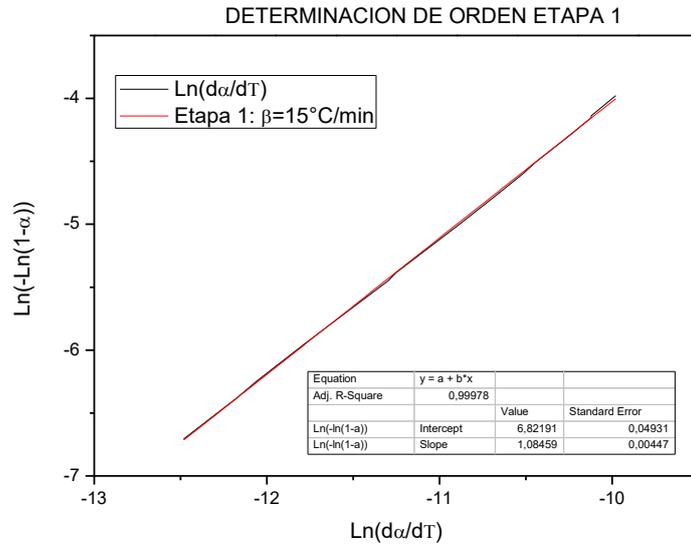


Gráfico 11-3. Determinación de orden etapa 1 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

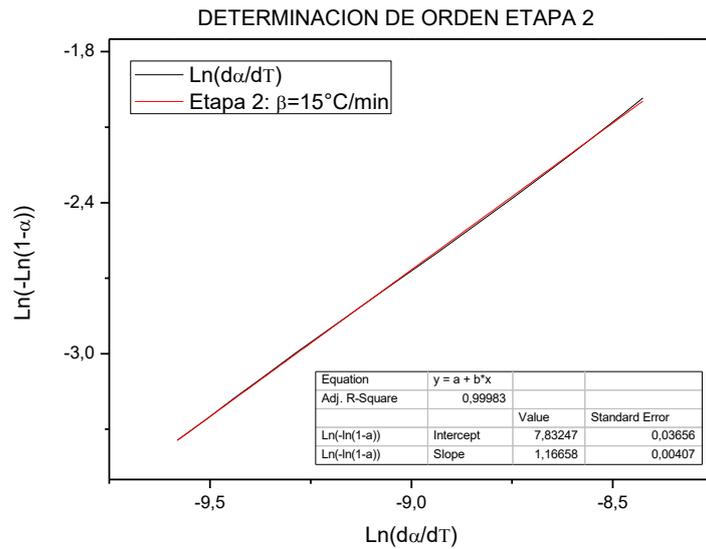


Gráfico 12-3. Determinación de orden etapa 2 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

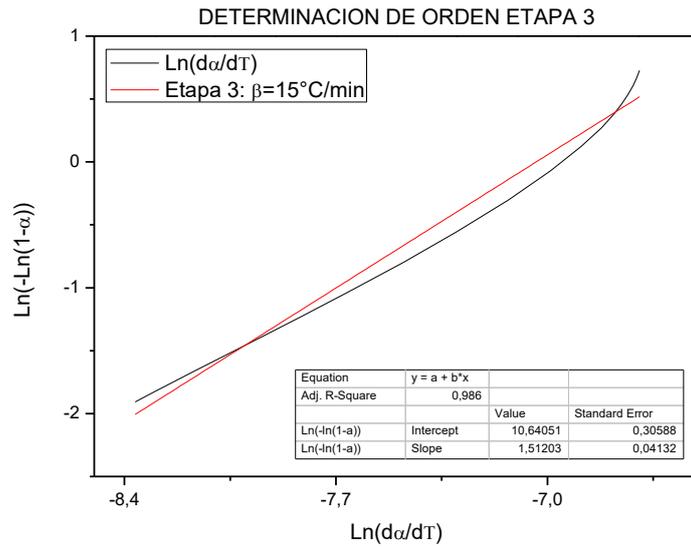


Gráfico 13-3. Determinación de orden etapa 3 con $\beta = 15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

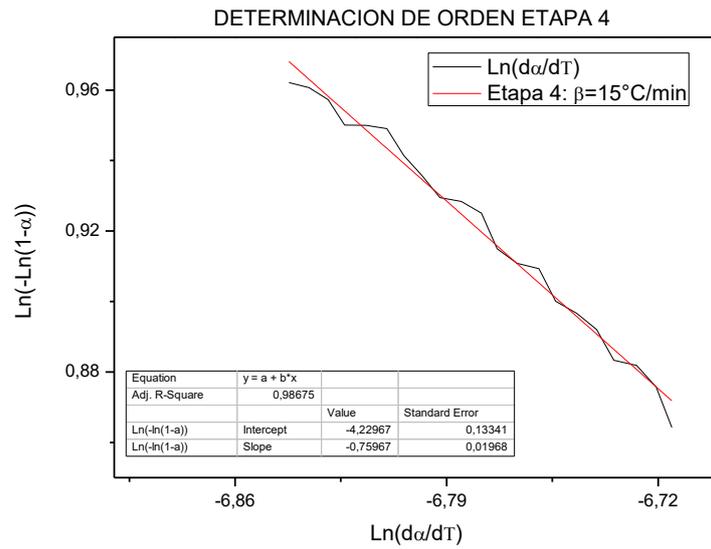


Gráfico 14-3. Determinación de orden etapa 4 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021.

Tabla 5-3. Valores por etapa, determinación de orden de reacción

Etapa	Regresión lineal	R^2	Orden de reacción	Ea (KJ/Kg)	A (s^{-1})
$\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$					
1	$\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\alpha)) = 1,096 \cdot \text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) + 6,9064$	0,9994	1,096	106,433	11,483
2	$\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\alpha)) = 1,165 \cdot \text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) + 7,7914$	0,9998	1,165	132,568	14,235
3	$\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\alpha)) = 1,581 \cdot \text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) + 11,111$	0,9813	1,581	183,936	21,129
4	$\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\alpha)) = -5,2473 \cdot \text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) - 33,8$	0,9701	-5,2473	86,5325	16,324
$\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$					
1	$\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\alpha)) = 1,0846 \cdot \text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) + 6,8219$	0,9998	1,0846	104,716	10,347
2	$\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\alpha)) = 1,1666 \cdot \text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) + 7,8325$	0,9998	1,1666	128,100	12,973
3	$\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\alpha)) = 1,512 \cdot \text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) + 10,641$	0,9867	1,512	173,517	18,397
4	$\text{Ln}(-\text{Ln}(1-\alpha)) = -0,7597 \cdot \text{Ln}\left(\frac{d\alpha}{dT}\right) - 4,22$	0,9874	-0,7997	63,723	15,635

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

La tabla 5-3 presenta los resultados del cálculo del orden de reacción en cada una de las etapas de degradación del látex natural (*Hevea Brasiliensis*), se observa que la cinética de reacción predominante es de primer orden principalmente en la etapa de degradación polimérica. El coeficiente de correlación (R^2) es superior a 0,98 en la tercera etapa para las tasas de calentamiento de 5 y 15 °/min, lo cual está en concordancia con los resultados obtenidos en los estudios de Medeiros et al. (2009, p. 3), en el que el orden de reacción obtenido fue $n = 1,24$, mientras que Liu et al. (2018, p. 14) reporta un valor de $n = 1,72$, además señala que las etapas inicial y final suelen presentar valores inconsistentes por lo que se asume que el orden de reacción es 0.

3.1.5.2 Método de Friedman

El modelo cinético basado en el método de Friedman es ampliamente ocupado para describir la cinética de la biomasa, supone que es independiente de la temperatura y más bien depende de la velocidad de pérdida de peso en función de α constante (Çepelioğullar et al., 2018, p. 3).

$$\text{Ln}\left[\beta\left(\frac{d\alpha}{dT}\right)\right] = \text{Ln}[A \cdot f(\alpha)] - \frac{Ea}{RT}$$

Siguiendo la forma de la ecuación general de la recta se grafica $\ln \left[\beta \left(\frac{d\alpha}{dT} \right) \right]$ vs $\left(\frac{1}{T} \right)$, de donde se obtiene la pendiente $b = \frac{Ea}{RT}$, mediante la cual se calcula la energía de activación (Ea) y el factor pre exponencial (A) se obtiene con el intercepto $\ln[A \cdot f(\alpha)]$.

- Rampa 1: $5 \frac{^{\circ}C}{min}$

Etapa 1:

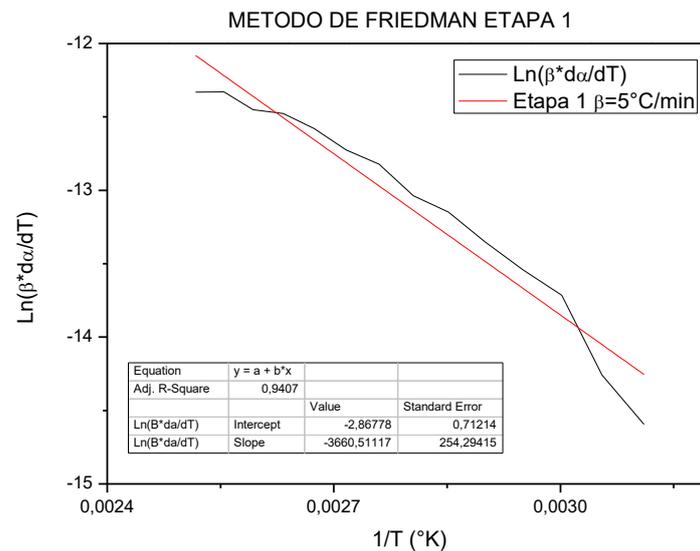


Gráfico 15-3. Método de Friedman etapa 1 con $\beta=5 \frac{^{\circ}C}{min}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

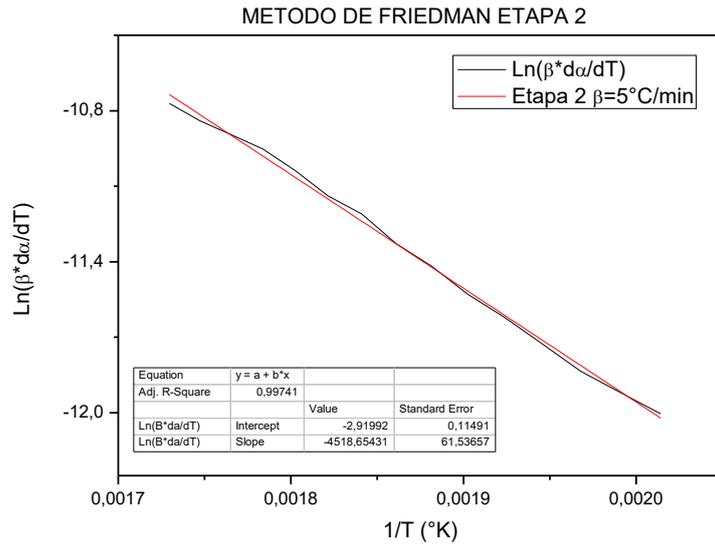


Gráfico 16-3. Método de Friedman etapa 2 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

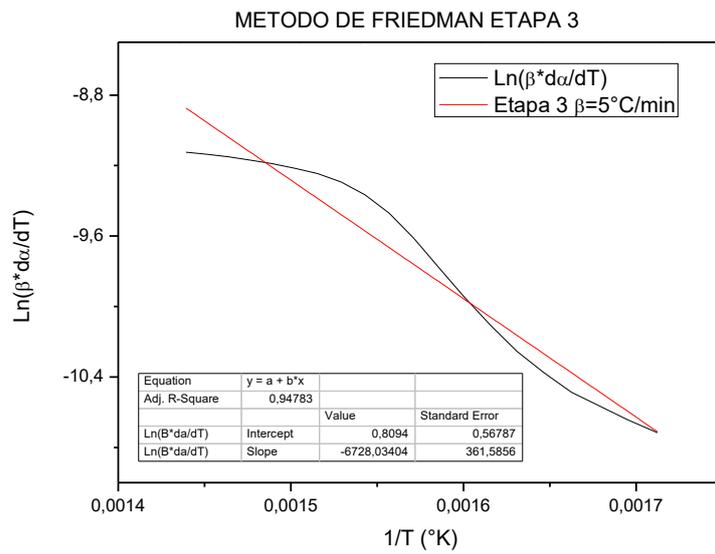


Gráfico 17-3. Método de Friedman etapa 3 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

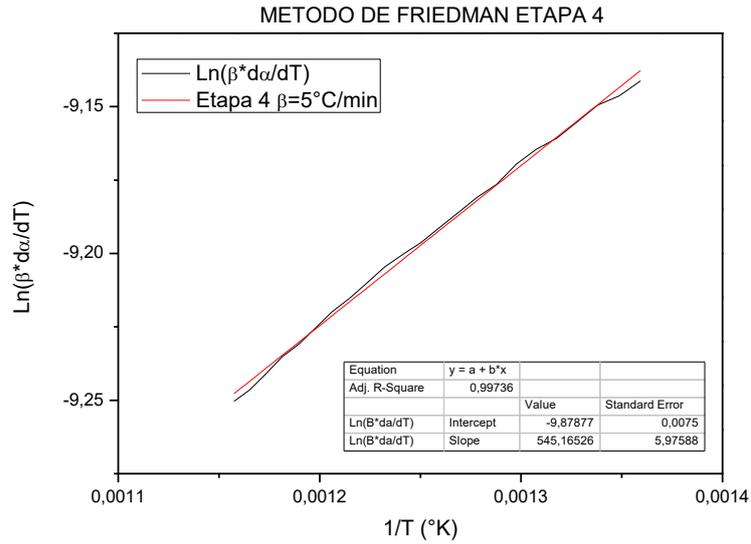


Gráfico 18-3. Método de Friedman etapa 4 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

- Rampa 2: $15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Etapa 1:

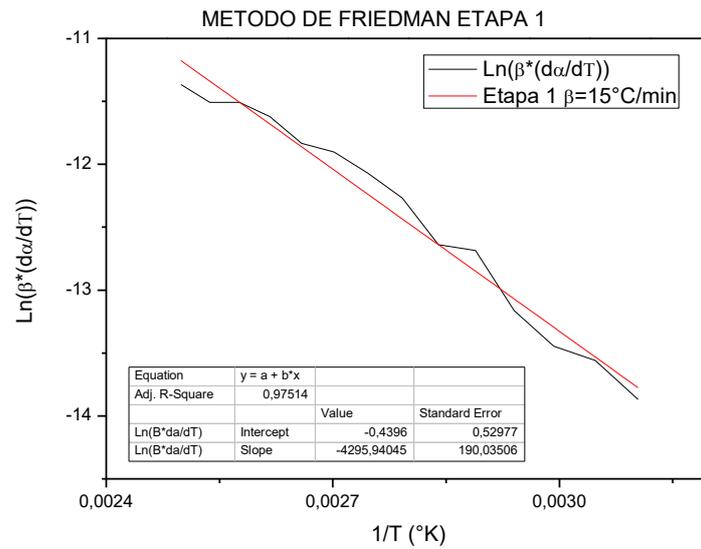


Gráfico 19-3. Método de Friedman etapa 1 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

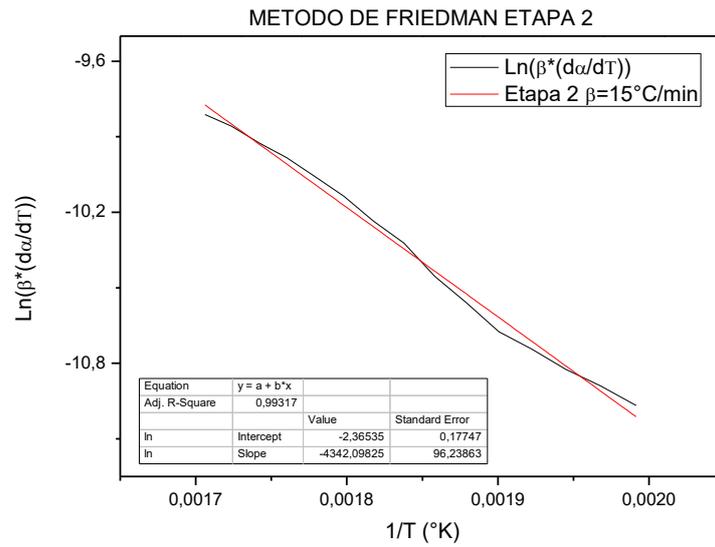


Gráfico 20-3. Método de Friedman etapa 2 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

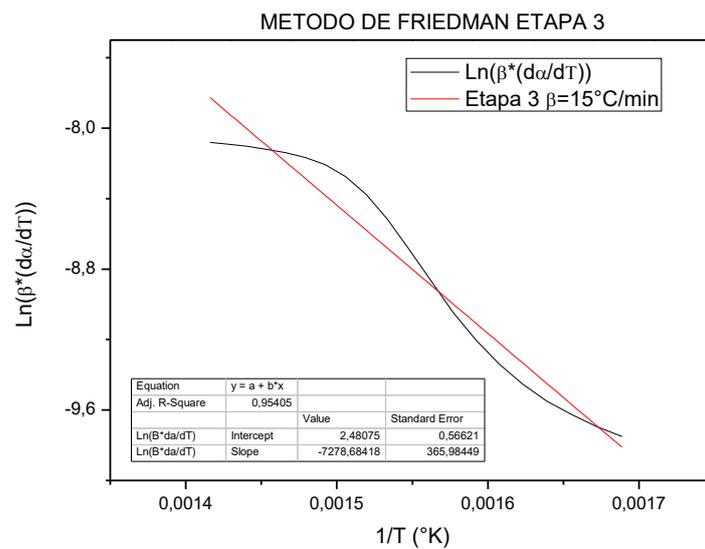


Gráfico 21-3. Método de Friedman etapa 3 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

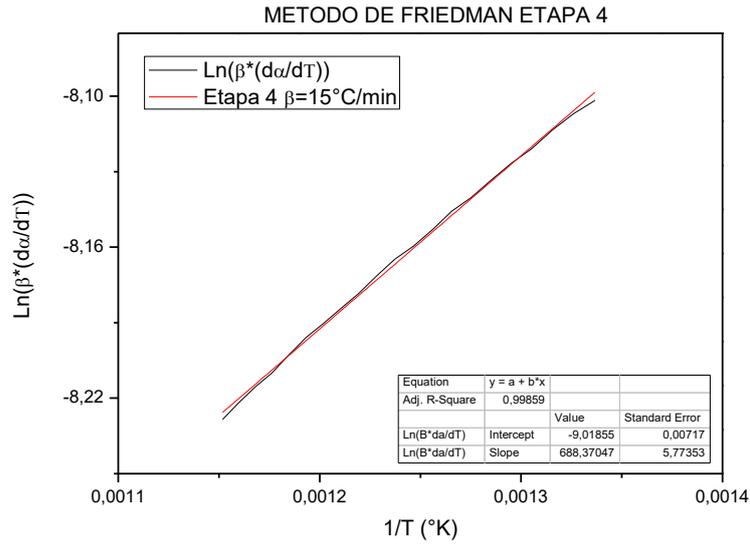


Gráfico 22-3. Método de Friedman etapa 4 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Tabla 6-3. Resultados por etapa, método de Friedman

Etapa	Regresión lineal	R^2	Ea (KJ/mol)	A (s^{-1})
$\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$				
1	$\text{Ln}\left(\beta \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right) = -3660,5 \cdot \frac{1}{T} - 2,8678$	0,9453	94,774	23,671
2	$\text{Ln}\left(\beta \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right) = -4518,7 \cdot \frac{1}{T} - 2,9199$	0,9976	118,755	29,342
3	$\text{Ln}\left(\beta \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right) = -6728 \cdot \frac{1}{T} - 0,8094$	0,9506	143,725	34,937
4	$\text{Ln}\left(\beta \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right) = 545,17 \cdot \frac{1}{T} - 9,8788$	0,9975	106,434	26,639
$\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$				
1	$\text{Ln}\left(\beta \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right) = -4295 \cdot \frac{1}{T} - 0,4396$	0,9771	87,942	21,424
2	$\text{Ln}\left(\beta \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right) = -4342,1 \cdot \frac{1}{T} - 2,3653$	0,9937	112,318	27,682
3	$\text{Ln}\left(\beta \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right) = -7278,7 \cdot \frac{1}{T} + 2,4808$	0,9565	136,204	31,778
4	$\text{Ln}\left(\beta \cdot \frac{d\alpha}{dT}\right) = 688,37 \cdot \frac{1}{T} - 9,0186$	0,9987	108,599	25,163

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

El coeficiente de correlación (R^2) es bajo en algunas etapas (0,94), los datos no se ajustan de forma correcta, las energías de activación tienen una diferencia de $\pm 50 \left(\frac{\text{KJ}}{\text{mol}}\right)$ en comparación con Wang & Zhao (2015, p. 4), quien enuncia que la energía de activación es calculada en el

rango de 170-180 $\left(\frac{KJ}{mol}\right)$. Pese a ligeras desviaciones el método de Friedman es bastante ocupado para describir la cinética de la biomasa como lo afirma Mallick et al. (2018, p. 4)

3.1.5.3 Método de Coast-Redfern

El método integral de Coast-Redfern se puede utilizar para determinar parámetros cinéticos como la energía de activación y factor pre exponencial, además Soh et al. (2019, p. 4) señala que el modelo de reacción supone la reacción de n-ésimo orden.

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$$

Existen tres escenarios posibles que se muestran en la tabla 3-1 en cuanto valor que asuma la función (Peng et al., 2011, p. 3), en cada uno de ellos se realiza un ajuste lineal para confirmar el orden de reacción en cada una de las etapas de degradación del látex natural. El proceso es aplicado a las dos tasas de calentamiento.

- Cuando $n = 0$, se obtendrá la expresión siguiente:

$$\ln\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = \ln\left(\frac{AR}{\beta Ea}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{2RT}{Ea}\right)\right] - \frac{Ea}{RT}$$

La representación gráfica de $\ln\left(\frac{\alpha}{T^2}\right)$ vs $\left(\frac{1}{T}\right)$, permitirá obtener la pendiente de la recta $\left(\frac{Ea}{R}\right)$ para el cálculo de la energía de activación y factor pre exponencial (Hayeemasae et al., 2019, p. 3).

- Cuando $n=1$ se tiene la expresión siguiente:

$$\ln\left[\frac{-\ln(1 - \alpha)}{T^2}\right] = \ln\left(\frac{AR}{\beta Ea}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{2RT}{Ea}\right)\right] - \frac{Ea}{RT}$$

La pendiente de la recta $\left(\frac{Ea}{R}\right)$ se obtiene al representar $\ln\left[\frac{-\ln(1-\alpha)}{T^2}\right]$ vs $\left(\frac{1}{T}\right)$, de esta forma se puede calcular la energía de activación al igual que el factor pre exponencial se calcula con el intercepto (Hayeemasae et al., 2019, p. 3).

- Cuando $n \neq 1$ se tiene la expresión siguiente :

$$\ln\left[\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1 - n)}\right] = \ln\left(\frac{AR}{\beta Ea}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{2RT}{Ea}\right)\right] - \frac{Ea}{RT}$$

El cálculo de la energía de activación se realiza con la representación de $\ln\left[\frac{1-(1-\alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)}\right]$ vs $\left(\frac{1}{T}\right)$ de manera similar a lo mencionado (Soh et al., 2019, p. 4).

- Rampa 1: $5 \frac{^{\circ}C}{min}$

Etapa 1:

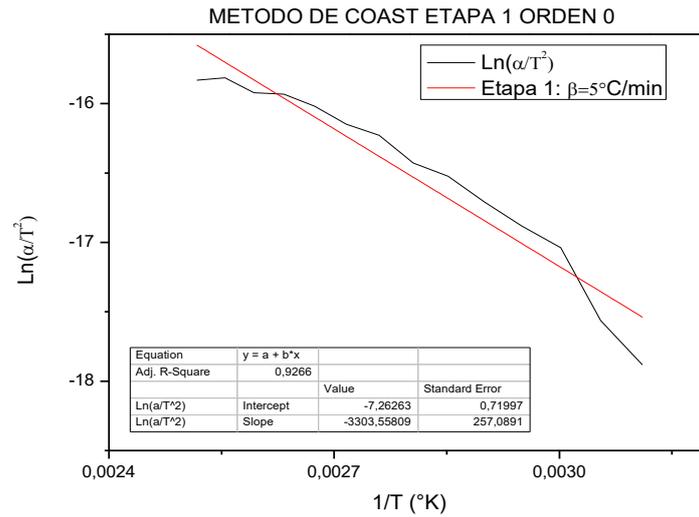


Gráfico 23-3. Método de (C-R) etapa 1 con orden 0 para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

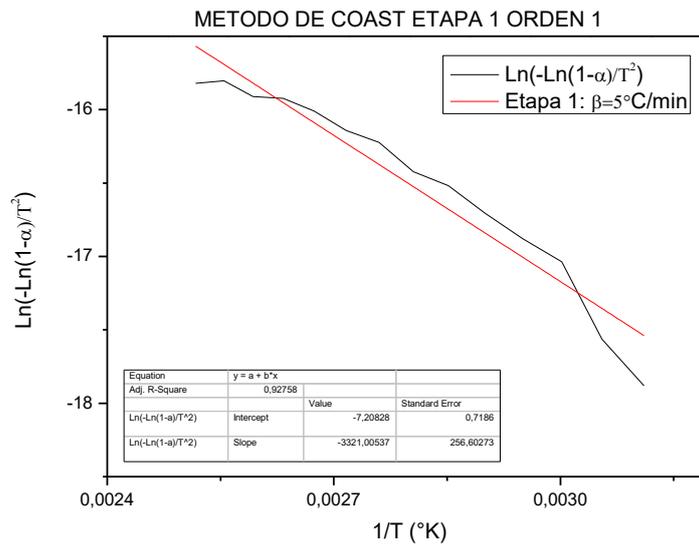


Gráfico 24-3. Método de (C-R) etapa 1 con orden 1 para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

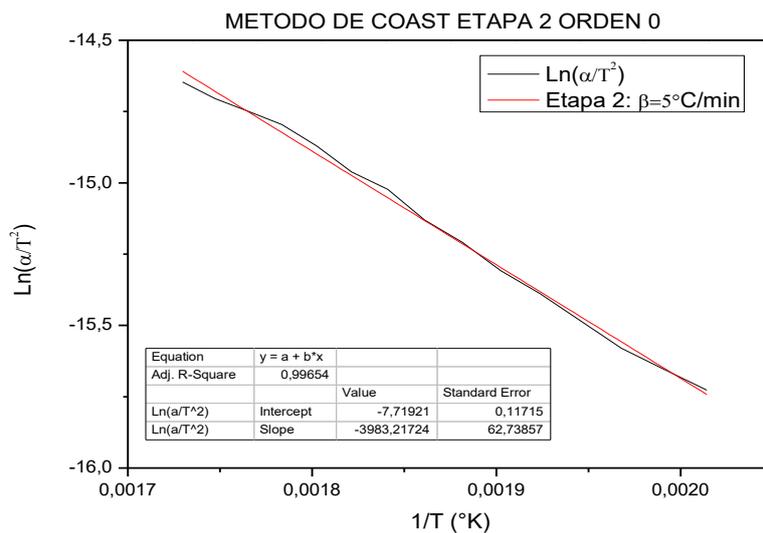


Gráfico 25-3. Método de (C-R) etapa 2 con orden 0 para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

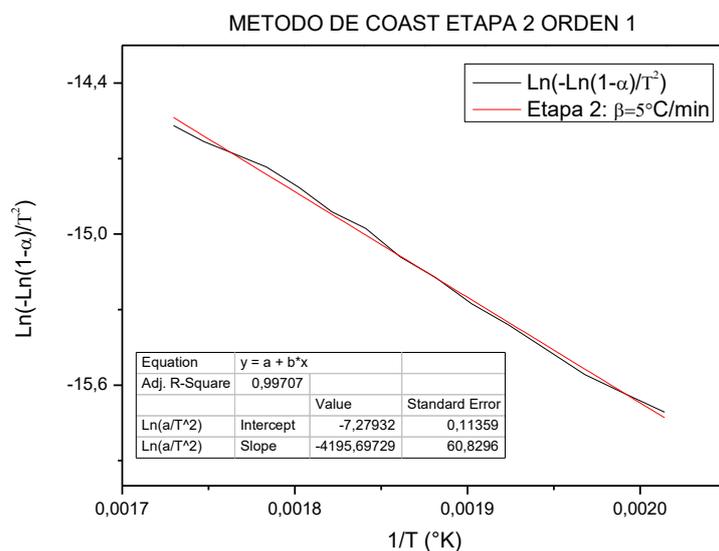


Gráfico 26-3. Método de (C-R) etapa 2 con orden 1 para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

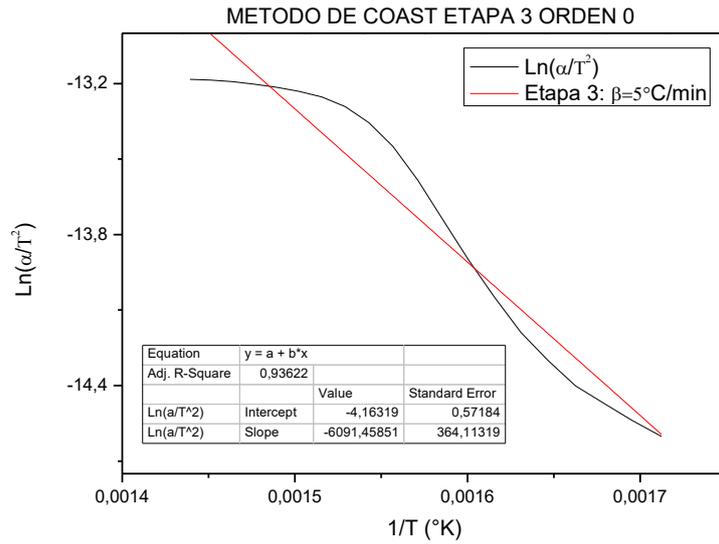


Gráfico 27-3. Método de (C-R) etapa 3 con orden 0 para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

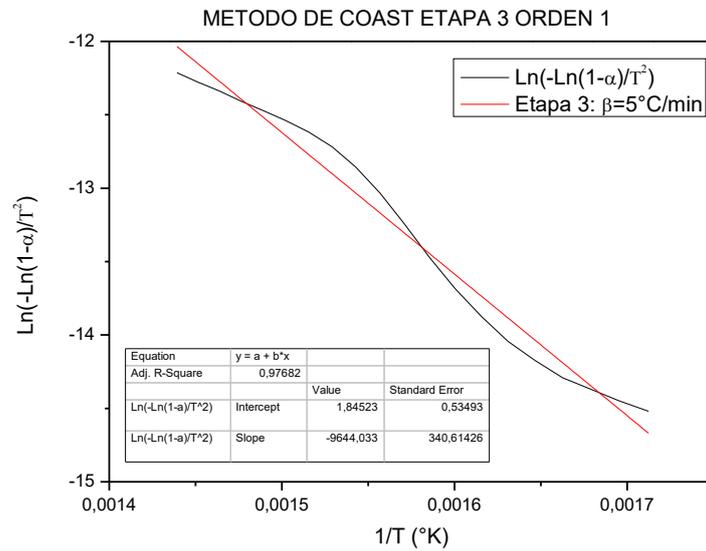


Gráfico 28-3. Método de (C-R) etapa 3 con orden 1 para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

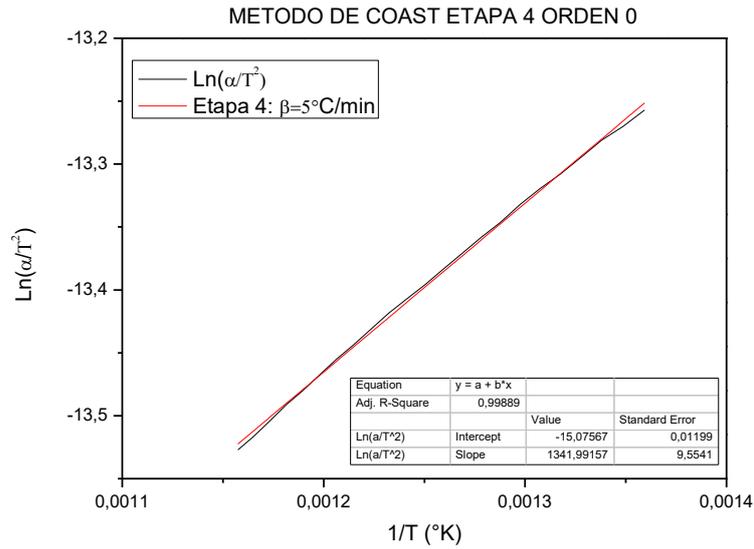


Gráfico 29-3. Método de (C-R) etapa 4 con orden 0 para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

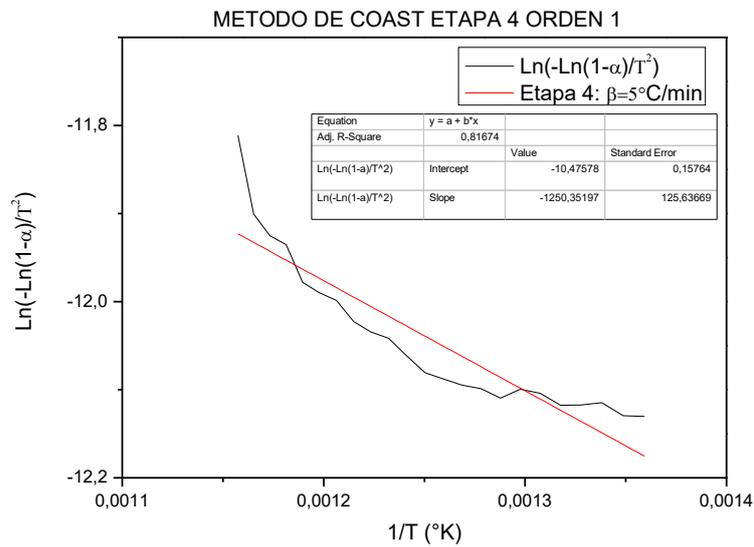


Gráfico 30-3. Método de (C-R) etapa 4 con orden 1 para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

- *Corrección del orden de reacción de acuerdo al orden precalculado*

El modelo cinético basado en el método de Coast-Redfern permite calcular parámetros cinéticos incluso cuando el orden de reacción es diferente de uno (Peng et al., 2011, p. 3), el valor aparente de n se conoce en los resultados mostrados en la tabla 5-3, es por ello que se realiza una corrección

con el orden de reacción precalculado. El ajuste lineal confirmara la sensibilidad de la elección del valor correcto de n .

Cuando el valor de n es conocido se utiliza:

$$\ln \left[\frac{1 - (1 - \alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right] = \ln \left(\frac{AR}{\beta Ea} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{2RT}{Ea} \right) \right] - \frac{Ea}{RT}$$

La representación grafican de $\ln \left[\frac{1-(1-\alpha)^{1-n}}{T^2(1-n)} \right]$ vs $\left(\frac{1}{T} \right)$, permite conocer valores más ajustados de energía de activación y factor pre exponencial.

Etapa 1:

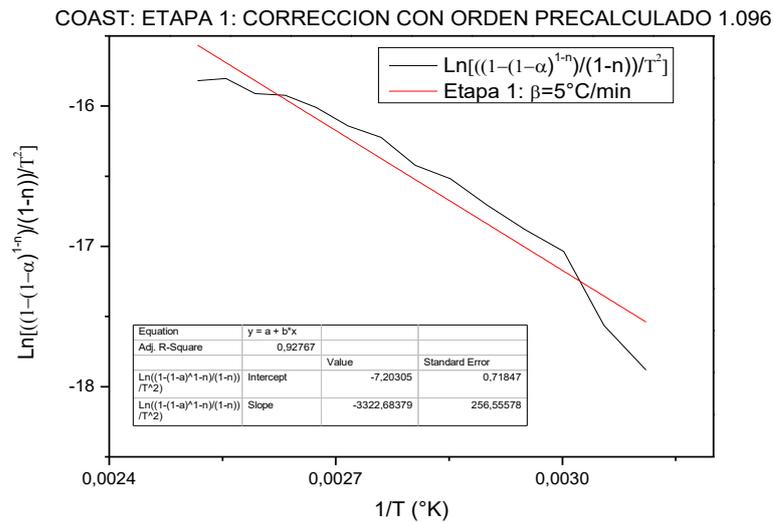


Gráfico 31-3. Método (C-R) etapa 1 con orden conocido $\beta=5 \frac{°C}{min}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

COAST: ETAPA 2: CORRECCION CON ORDEN PRECALCULADO 1.165

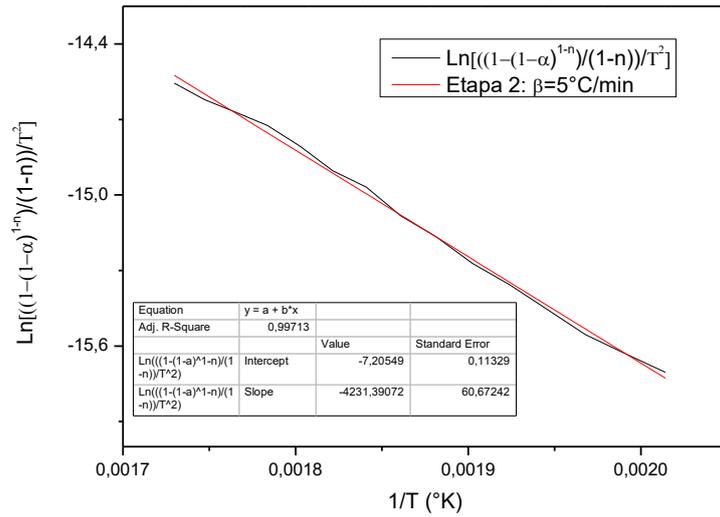


Gráfico 32-3. Método (C-R) etapa 2 con orden conocido $\beta = 5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

COAST:ETAPA 3: CORRECCION CON ORDEN PRECALCULADO 1.5807

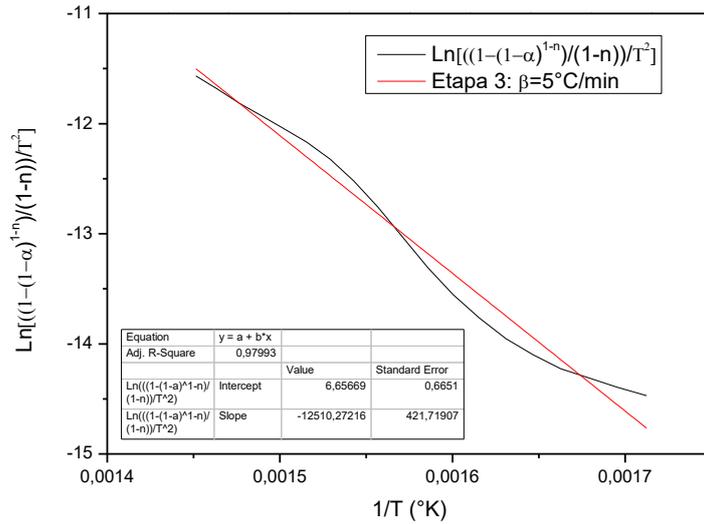


Gráfico 33-3. Método (C-R) etapa 3 con orden conocido $\beta = 5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

COAST: ETAPA 4: CORRECCION CON ORDEN PRECALCULADO -5.2473

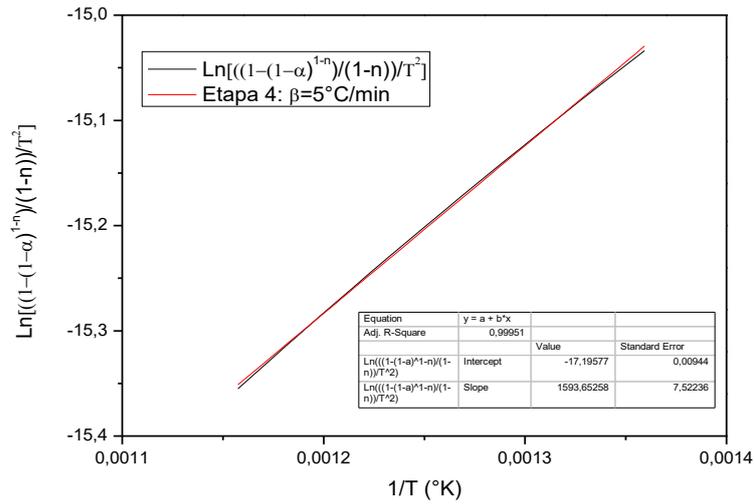


Gráfico 34-3. Método (C-R) etapa 4 con orden conocido $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

- Rampa 2: $15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Etapa 1:

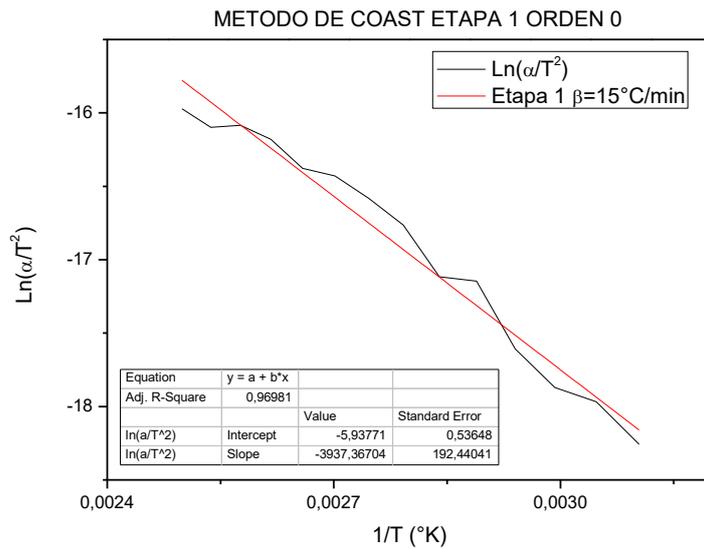


Gráfico 35-3. Método (C-R) etapa 1 con orden 0 para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

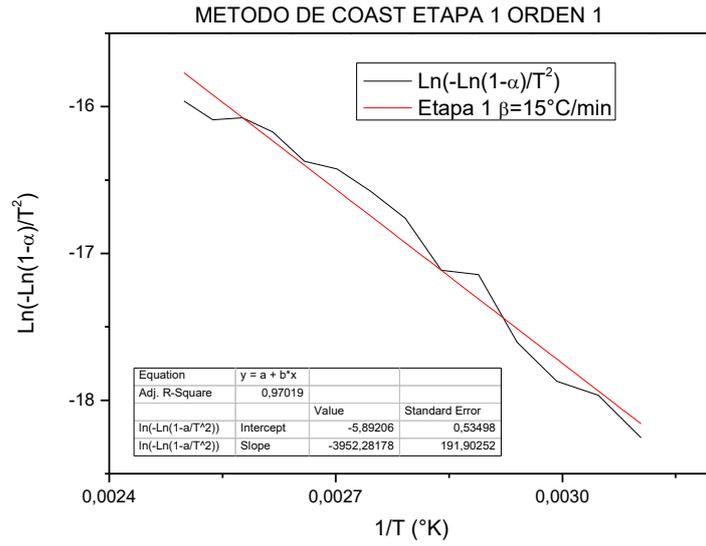


Gráfico 36-3. Método (C-R) etapa 1 con orden 1 para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

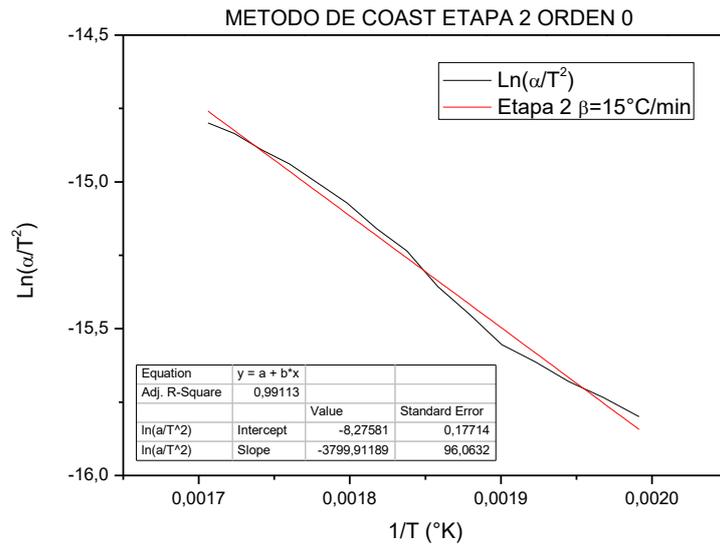


Gráfico 37-3. Método (C-R) etapa 2 con orden 0 para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

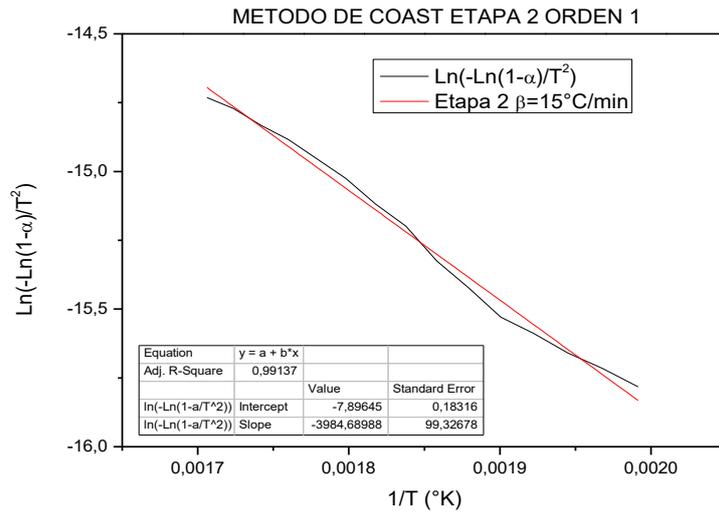


Gráfico 38-3. Método (C-R) etapa 2 con orden 1 para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

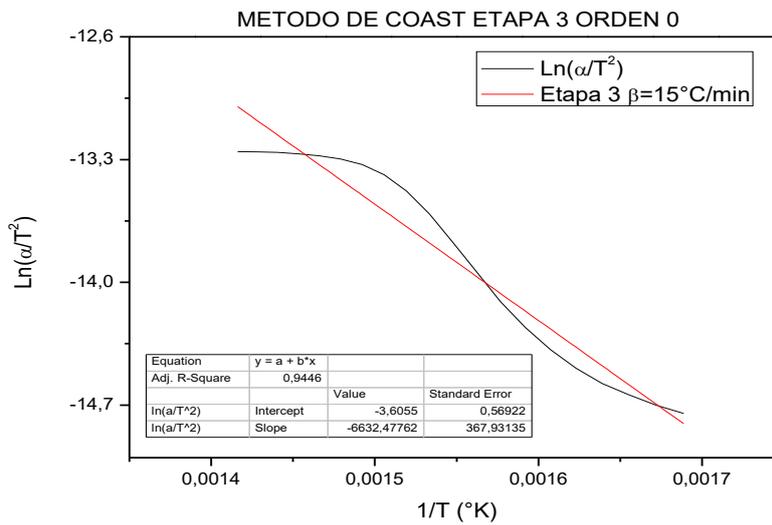


Gráfico 39-3. Método (C-R) etapa 3 con orden 0 para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

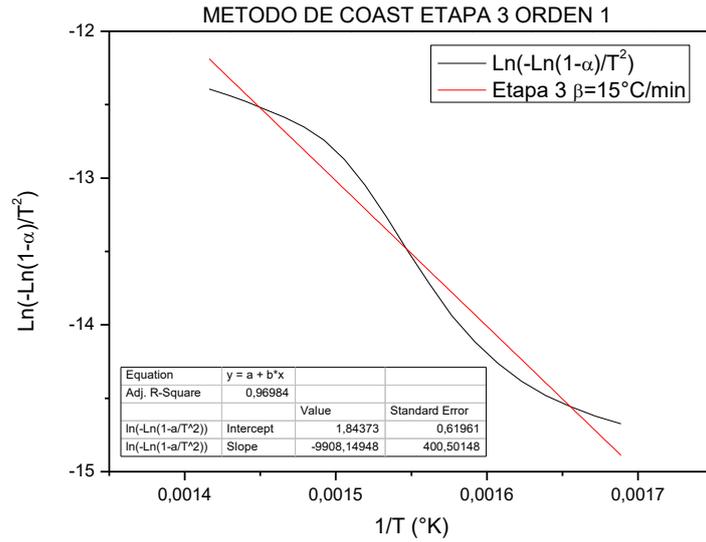


Gráfico 40-3. Método (C-R) etapa 3 con orden 1 para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

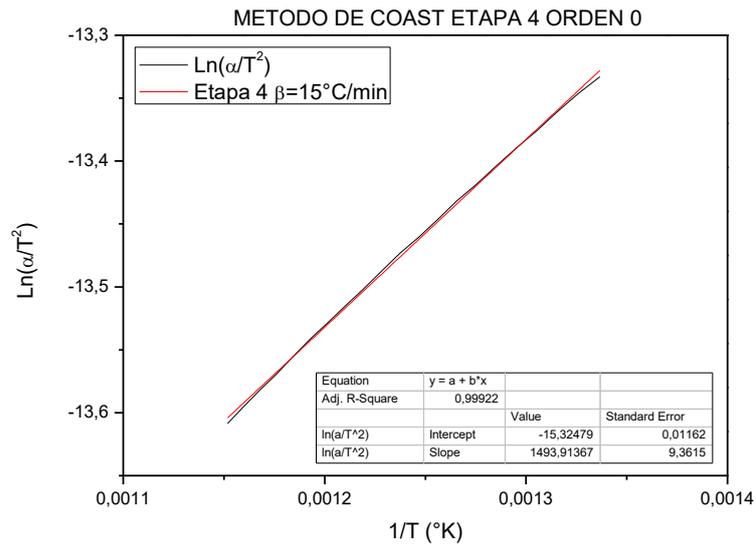


Gráfico 41-3. Método (C-R) etapa 4 con orden 0 para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

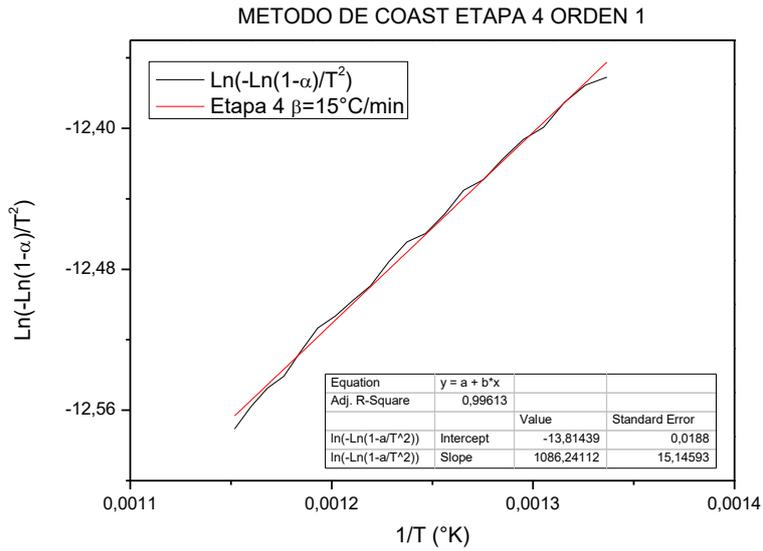


Gráfico 42-3. Método (C-R) etapa 4 con orden 1 para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

- *Corrección del orden de reacción de acuerdo al orden precalculado*

Etapa 1

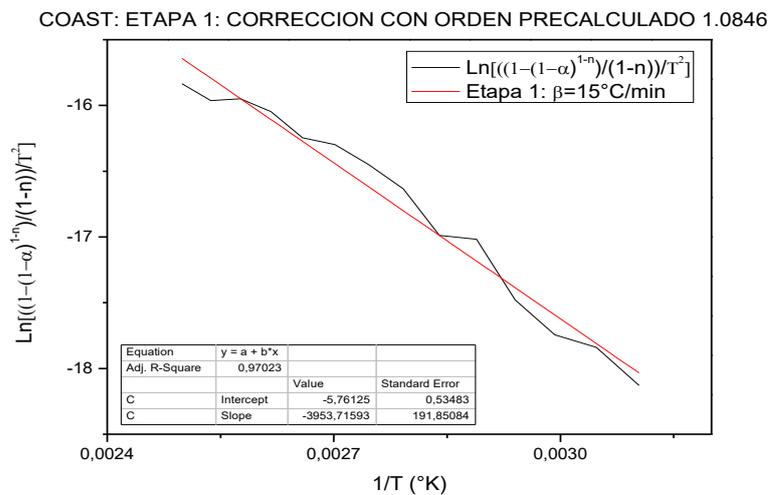


Gráfico 43-3. Método (C-R) etapa 1 con orden conocido $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

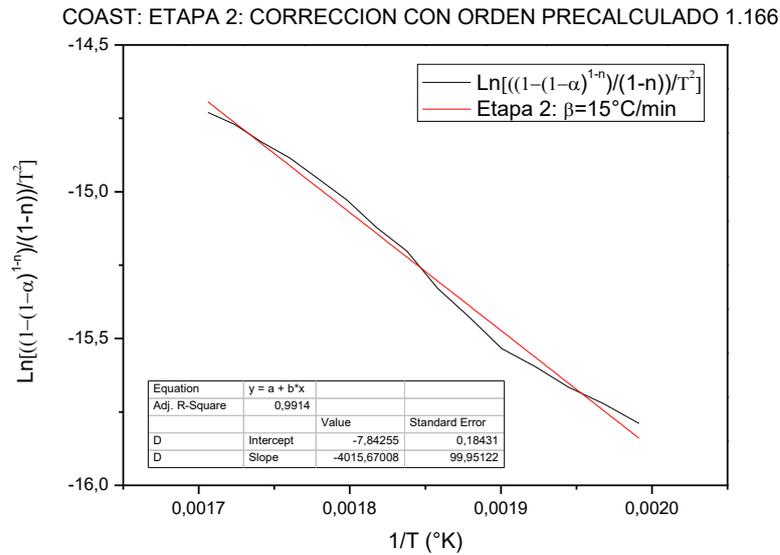


Gráfico 44-3. Método (C-R) etapa 2 con orden conocido

$$\beta = 15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

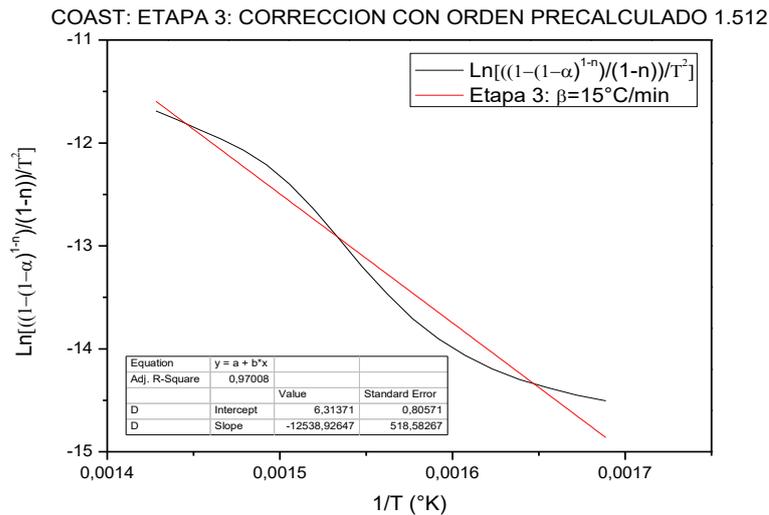


Gráfico 45-3. Método (C-R) etapa 3 con orden conocido

$$\beta = 15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

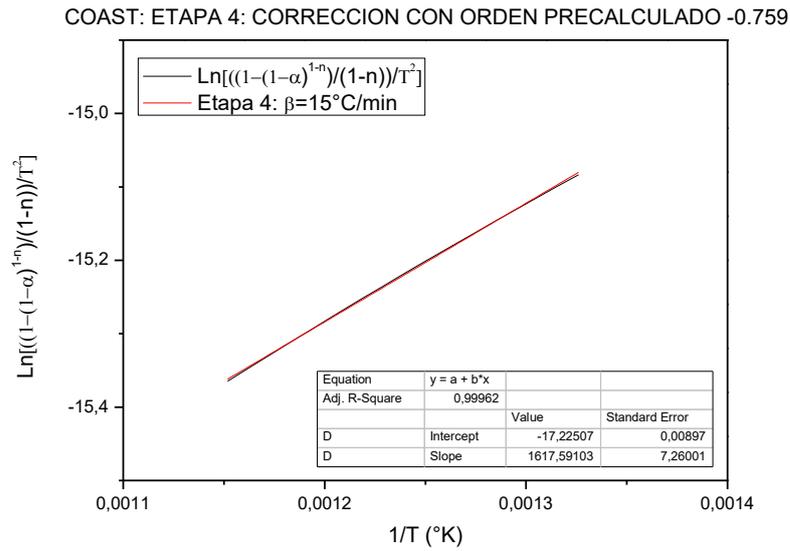


Gráfico 46-3. Método (C-R) etapa 4 con orden conocido
 $\beta = 15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Tabla 7-3. Resultados por etapa, método de Coast-Redfern

Etapa	Regresión lineal	R ²	Ea (KJ/mol)	A (s ⁻¹)
β=5°C/min				
Coast-Redfern orden de reacción 0				
1	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = -3303,6 \cdot \frac{1}{T} - 7,26263$	0,9822	78,466	12,237
2	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = -3983,2 \cdot \frac{1}{T} - 7,7192$	0,9468	95,116	16,627
3	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = -6091,5 \cdot \frac{1}{T} - 4,1632$	0,9396	130,644	26,307
4	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = 1342,0 \cdot \frac{1}{T} - 15,076$	0,9989	112,157	19,153
Coast-Redfern orden de reacción 1				
1	$\text{Ln}\left(\frac{-\text{Ln}(1-\alpha)}{T^2}\right) = -3321,01 \cdot \frac{1}{T} - 7,20828$	0,9331	102,610	10,274
2	$\text{Ln}\left(\frac{-\text{Ln}(1-\alpha)}{T^2}\right) = -4195,7 \cdot \frac{1}{T} - 7,2793$	0,9873	138,883	15,204
3	$\text{Ln}\left(\frac{-\text{Ln}(1-\alpha)}{T^2}\right) = -9644 \cdot \frac{1}{T} + 1,8452$	0,988	162,180	27,788

4	$\text{Ln}\left(\frac{-\text{Ln}(1-\alpha)}{T^2}\right) = -1250,41 \cdot \frac{1}{T} - 10,476$	0,9451	146,395	18,374
Coast-Redfern corrección con orden de reacción precalculado				
1	$\text{Ln}\left(\frac{\frac{[1-(1-\alpha)^{1-n}]}{(1-n)}}{T^2}\right) = -3322,68 \cdot \frac{1}{T} - 7,203$	0,9332	89,624	12,274
2	$\text{Ln}\left(\frac{\frac{[1-(1-\alpha)^{1-n}]}{(1-n)}}{T^2}\right) = -4231,4 \cdot \frac{1}{T} - 7,2055$	0,9873	135,179	16,015
3	$\text{Ln}\left(\frac{\frac{[1-(1-\alpha)^{1-n}]}{(1-n)}}{T^2}\right) = -12510 \cdot \frac{1}{T} - 6,6567$	0,9981	178,008	29,7884
4	$\text{Ln}\left(\frac{\frac{[1-(1-\alpha)^{1-n}]}{(1-n)}}{T^2}\right) = 1593,7 \cdot \frac{1}{T} - 17,196$	0,9195	156,202	18,253
$\beta=15^\circ\text{C}/\text{min}$				
Coast-Redfern orden de reacción 0				
1	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = -3937,4 \cdot \frac{1}{T} - 5,9377$	0,9921	82,735	8,5709
2	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = -3799,9 \cdot \frac{1}{T} - 8,27258$	0,9518	106,592	14,062
3	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = -6632,5 \cdot \frac{1}{T} - 3,6055$	0,9474	134,142	19,987
4	$\text{Ln}\left(\frac{\alpha}{T^2}\right) = 1493,9 \cdot \frac{1}{T} - 15,325$	0,9893	114,422	16,312
Coast-Redfern orden de reacción 1				
1	$\text{Ln}\left(\frac{-\text{Ln}(1-\alpha)}{T^2}\right) = -3952,3 \cdot \frac{1}{T} - 5,8921$	0,9725	91,859	11,182
2	$\text{Ln}\left(\frac{-\text{Ln}(1-\alpha)}{T^2}\right) = -3984,7 \cdot \frac{1}{T} - 7,8965$	0,992	129,128	15,013
3	$\text{Ln}\left(\frac{-\text{Ln}(1-\alpha)}{T^2}\right) = -9908,1 \cdot \frac{1}{T} + 1,8437$	0,9814	164,375	21,212
4	$\text{Ln}\left(\frac{-\text{Ln}(1-\alpha)}{T^2}\right) = -1086,2 \cdot \frac{1}{T} - 13,814$	0,9563	141,030	17,337
Coast-Redfern corrección con orden de reacción precalculado				
1	$\text{Ln}\left(\frac{\frac{[1-(1-\alpha)^{1-n}]}{(1-n)}}{T^2}\right) = -3953,5,7 \cdot \frac{1}{T} - 5,888$	0,9725	108,869	12,614

2	$\ln\left(\frac{[1 - (1 - \alpha)^{1-n}]}{(1-n)T^2}\right) = -4004,6 \cdot \frac{1}{T} - 7,854$	0,9916	148,294	15,057
3	$\ln\left(\frac{[1 - (1 - \alpha)^{1-n}]}{(1-n)T^2}\right) = 12235 \cdot \frac{1}{T} + 5,6852$	0,9922	175,721	28,189
4	$\ln\left(\frac{[1 - (1 - \alpha)^{1-n}]}{(1-n)T^2}\right) = 1582,4 \cdot \frac{1}{T} - 15,927$	0,9395	158,156	24,199

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

En los resultados mostrados en la tabla 7-3, se observa que los datos tienden ajustarse de mejor forma en las tapa iniciales y finales cuando la función asume $n = 0$ ($R^2 > 0,98$), mientras que cuando la reacción supone ser de primer orden, los datos se ajustan mejor en las etapas intermedias conforme aumenta la temperatura. Finalmente se observar que existe un mejor ajuste en la función $n \neq 1$, en la que usaron los datos de orden de reacción presentados en la tabla 5-3. Los resultados obtenidos son bastante similares a los que reporta Liu et al. (2018, p. 14), quien ha usado un enfoque similar para el estudio del látex natural a una tasa de calentamiento de $10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, obteniendo valores de energía de activación $187,76 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$ y orden de reacción 1,72, esto indica que el ajuste lineal es bueno ($R^2 \geq 0,99$) en la etapa de degradación polimérica. La desviación que sufren los valores de energía de activación se debe a que esta disminuye al aumentar la tasa de calentamiento como lo enuncia (Tamri et al., 2018, p. 15).

3.1.5.4 Método de Flynn-Wall-Ozawa (FWO).

El método de Flynn-Wall-Ozawa es un método isoconvensional comúnmente aceptado para el cálculo de parámetros cinéticos (Fermoso & Mašek, 2018, p. 10), permite conocer la energía de activación aparente para cada grado de avance de la reacción basada en la ecuación siguiente:

$$\ln(\beta) = \ln\left(\frac{A Ea}{R g(\alpha)}\right) - 5,331 - 1,052 \frac{Ea}{RT}$$

La energía de activación se calcula con la pendiente $\left(\frac{Ea}{R}\right)$ al representar la gráfica lineal $\ln(\beta)$ vs $\left(\frac{1}{T}\right)$ (Tyng et al., 2020, p. 9).

- Rampa 1: $5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{min}}$

Etapa 1:

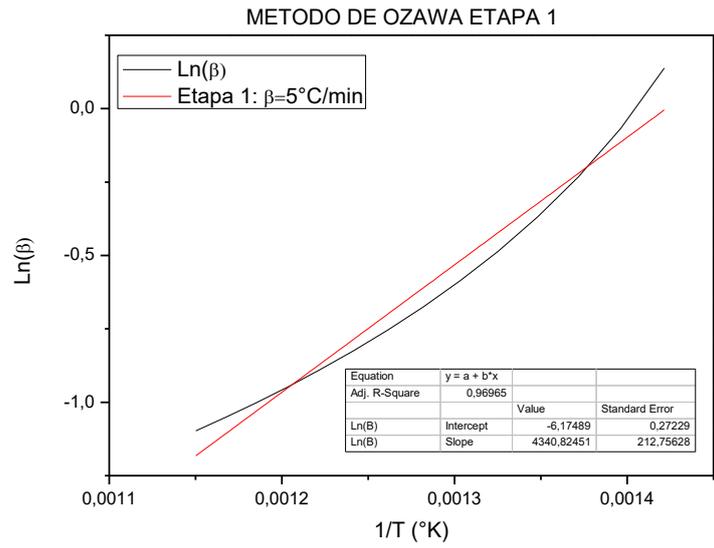


Gráfico 47-3. Método (FWO) etapa 1 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

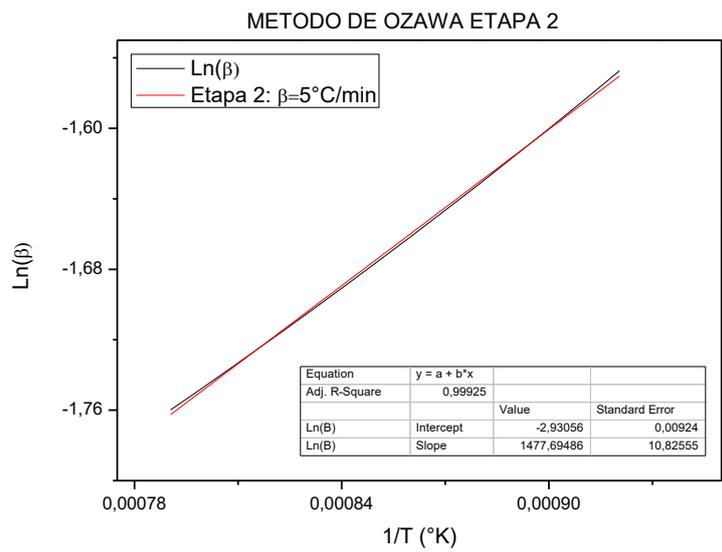


Gráfico 48-3. Método (FWO) etapa 2 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

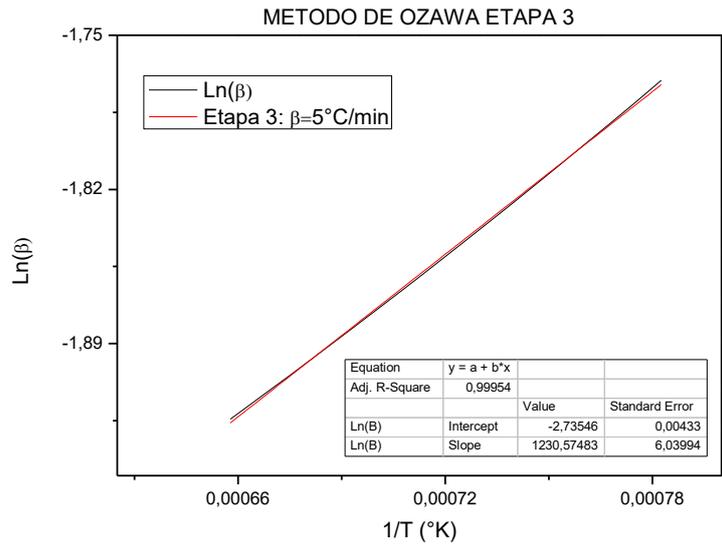


Gráfico 49-3. Método (FWO) etapa 3 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

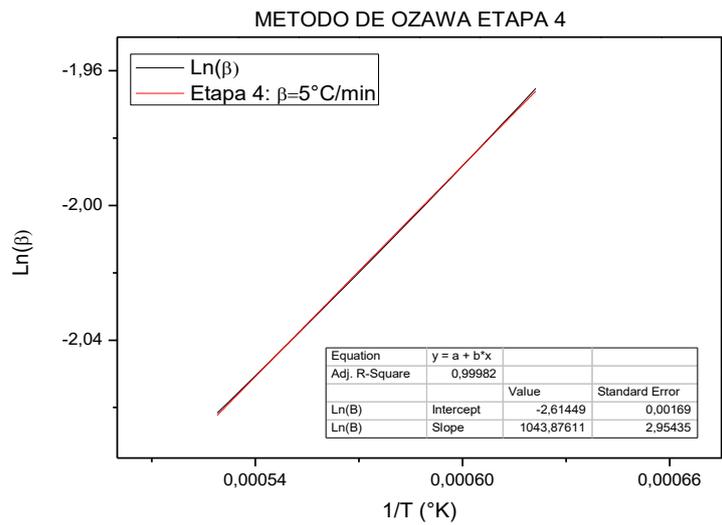


Gráfico 50-3. Método (FWO) etapa 4 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

- Rampa 2: $15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Etapa 1:

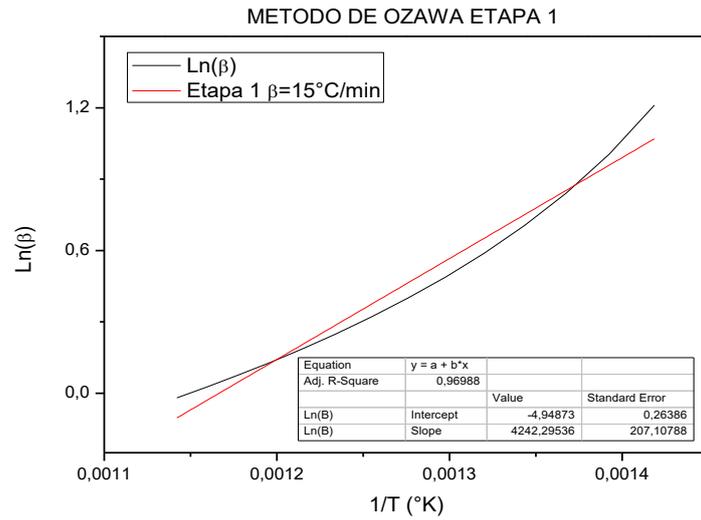


Gráfico 51-3. Método (FWO) etapa 1 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

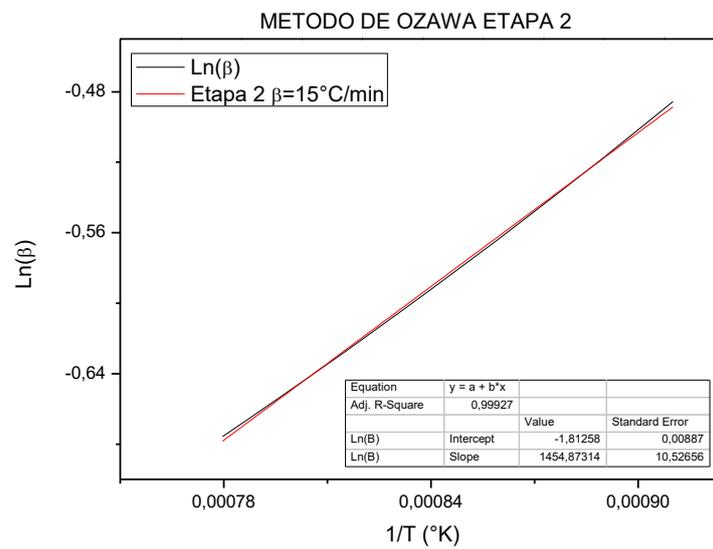


Gráfico 52-3. Método (FWO) etapa 2 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

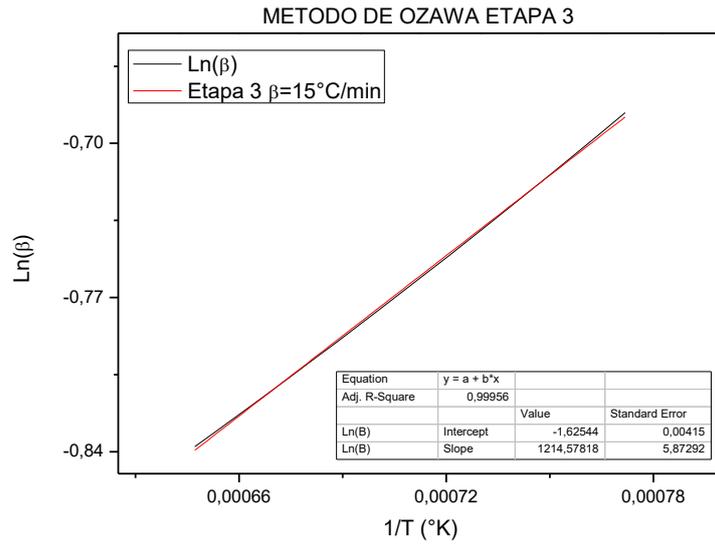


Gráfico 53-3. Método (FWO) etapa 3 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

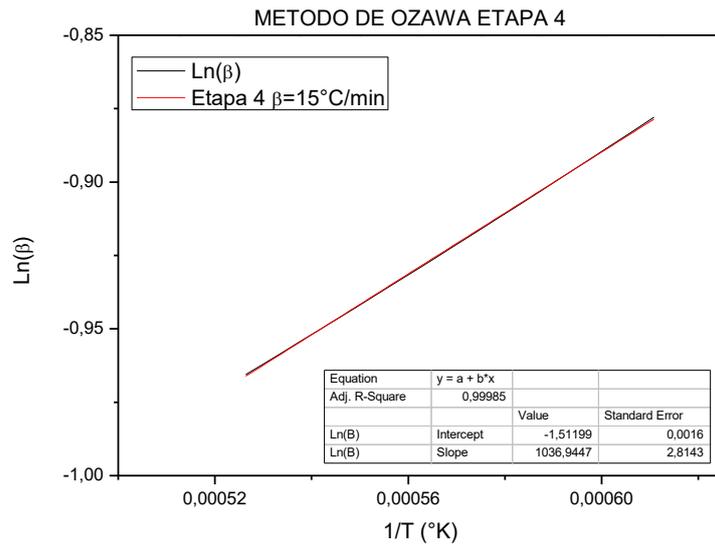


Gráfico 54-3. Método (FWO) etapa 4 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Tabla 8-3. Resultados por etapa, método (FWO)

Etapa	Regresión lineal	R ²	Ea(KJ/mol)	A (s ⁻¹)
-------	------------------	----------------	------------	----------------------

$\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$				
1	$\text{Ln}(\beta) = 4340,8 \cdot \frac{1}{T} - 6,1749$	0,972	103,305	12,264
2	$\text{Ln}(\beta) = 1477,7 \cdot \frac{1}{T} - 2,9306$	0,9993	134,204	14,923
3	$\text{Ln}(\beta) = 1230,6 \cdot \frac{1}{T} - 2,7355$	0,9996	183,725	15,283
4	$\text{Ln}(\beta) = -1043,9 \cdot \frac{1}{T} - 2,6145$	0,9998	153,249	13,852
$\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$				
1	$\text{Ln}(\beta) = 4242,3 \cdot \frac{1}{T} - 4,9487$	0,9722	106,527	10,136
2	$\text{Ln}(\beta) = -1454,9 \cdot \frac{1}{T} - 1,8126$	0,9993	142,498	12,003
3	$\text{Ln}(\beta) = -1214,6 \cdot \frac{1}{T} - 1,6254$	0,9996	181,599	14,539
4	$\text{Ln}(\beta) = 1039 \cdot \frac{1}{T} - 1,5132$	0,9999	166,211	11,846

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Como se puede visualizar en la tabla 8-3, el coeficiente de correlación (R^2) aumento considerablemente en comparación con los métodos de Friedman y Coast-Redfern, esto sugiere que los datos tienden a ajustarse mejor al momento de obtener parámetros cinéticos. Los valores de energía de activación se encuentran dentro del rango de los resultados obtenidos por Wang & Zhao (2015, p. 6), para un grado de conversión del 70% obtuvo una energía de activación de $184,33 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$ y un factor pre exponencial de $15,349 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ con un coeficiente de correlación 0,9989. Los resultados indicaron que la energía de activación disminuyo ($183,725-181,599 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$), al aumentar la tasa de calentamiento β de 5 a $15^{\circ}\text{C}/\text{min}$ como lo asegura Tamri et al. (2018, p. 4).

3.1.5.5 Método de Kissinger

El método isoconversional de Kissinger es un método de análisis cinéticos sin modelo, es decir que permite conocer parámetros cinéticos de una reacción en estado sólido sin necesidad de conocer el mecanismo de reacción (Fermoso & Mašek, 2018, p. 10), como lo representa la siguiente expresión:

$$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = \text{Ln}\left(\frac{AR}{Ea}\right) - \left(\frac{Ea}{RT}\right)$$

Este método supone que la energía de activación es constante en un grado de avance determinado (Mallick et al., 2018, p. 3). El grafico de $\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right)$ vs $\left(\frac{1}{T}\right)$ permite conocer la energía de activación aparente a partir de la pendiente de la recta $\left(\frac{Ea}{R}\right)$ para diferentes tasas de calentamiento.

- *Rampa 1:* $5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Etapa 1:

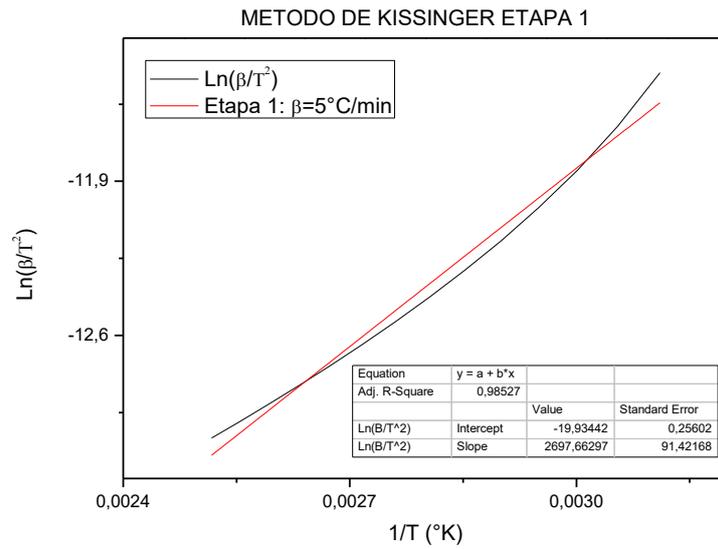


Gráfico 55-3. Método de Kissinger etapa 1 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

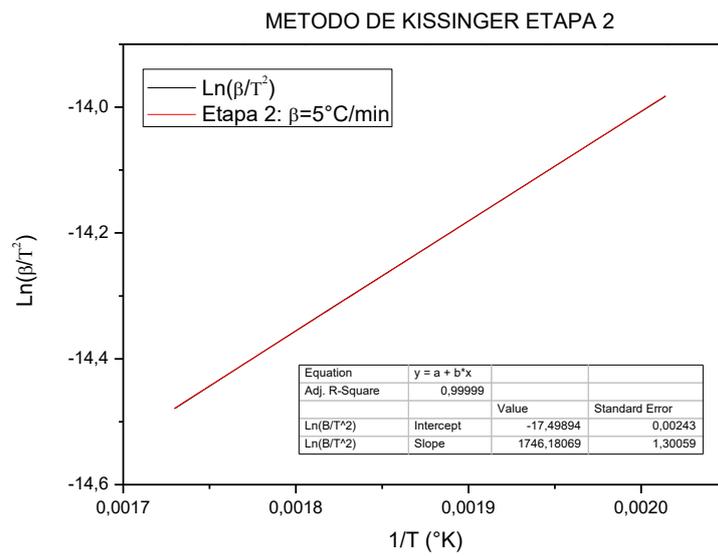


Gráfico 56-3. Método de Kissinger etapa 2 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

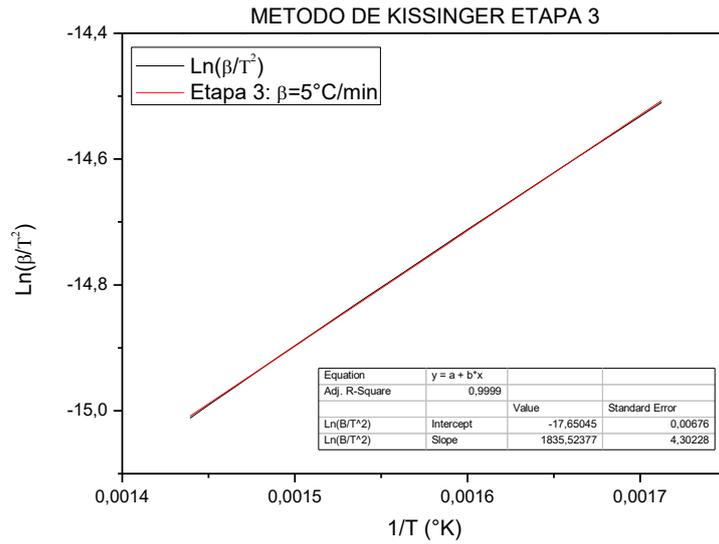


Gráfico 57-3. Método de Kissinger etapa 3 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

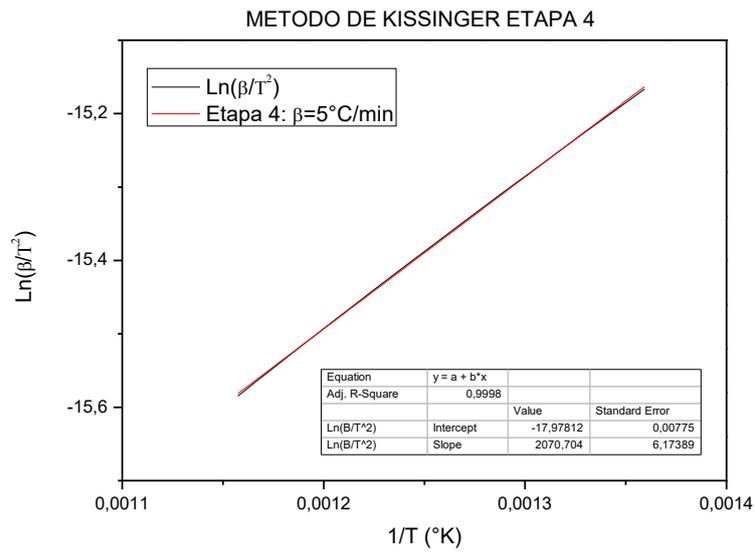


Gráfico 58-3. Método de Kissinger etapa 4 con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

- Rampa 2: $15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Etapa 1:

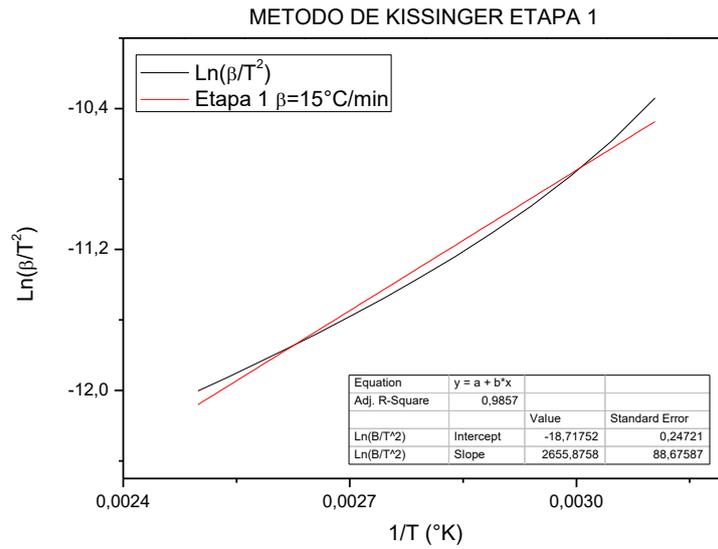


Gráfico 59-3. Método de Kissinger etapa 1 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 2:

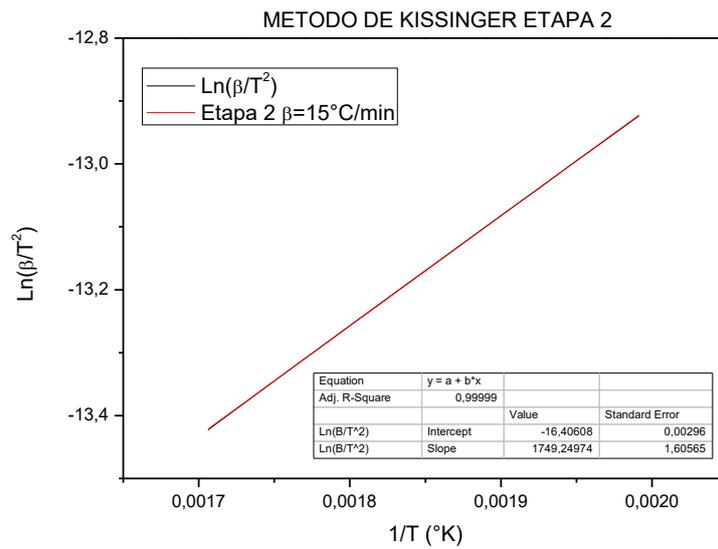


Gráfico 60-3. Método de Kissinger etapa 2 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 3:

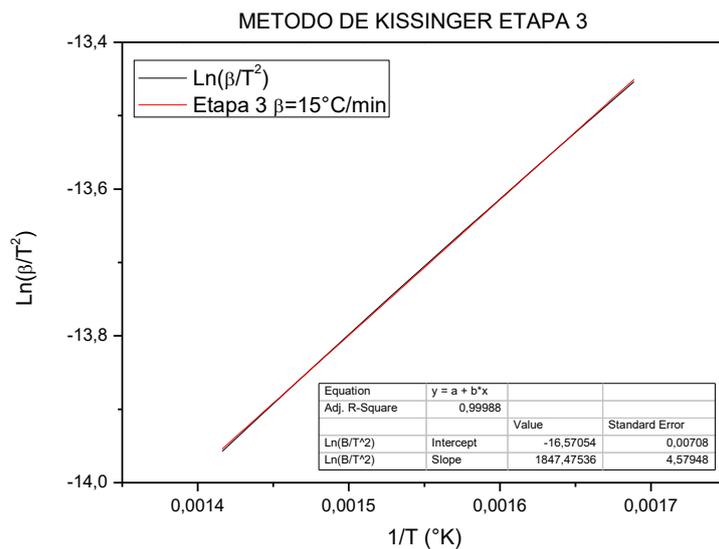


Gráfico 61-3. Método de Kissinger etapa 3 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Etapa 4:

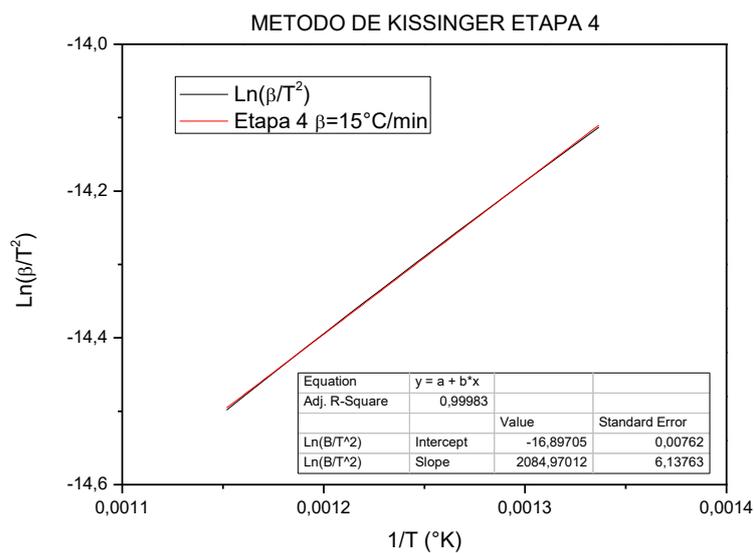


Gráfico 62-3. Método de Kissinger etapa 4 con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Tabla 9-3. Resultados por etapa, método de Kissinger

Etapa	Regresión lineal	R^2	Ea(KJ/mol)	A (s^{-1})
-------	------------------	-------	------------	----------------

$\beta=5^{\circ}\text{C}/\text{min}$				
1	$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = 2697,7 \cdot \frac{1}{T} - 19,934$	0,9864	126,428	13,458
2	$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = 1746,2 \cdot \frac{1}{T} - 17,499$	0,9999	164,517	16,745
3	$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = 1835,5 \cdot \frac{1}{T} - 17,65$	0,9999	182,860	19,234
4	$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = 2070,7 \cdot \frac{1}{T} - 17,978$	0,9998	168,215	17,296
$\beta=15^{\circ}\text{C}/\text{min}$				
1	$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = 2655,9 \cdot \frac{1}{T} - 18,718$	0,9868	114,081	10,492
2	$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = 1749,2 \cdot \frac{1}{T} - 16,406$	0,9999	156,542	14,511
3	$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = 1847,5 \cdot \frac{1}{T} - 16,571$	0,9999	178,360	18,174
4	$\text{Ln}\left(\frac{\beta}{T^2}\right) = 2085 \cdot \frac{1}{T} - 16,897$	0,9998	161,334	16,639

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

El método isoconversional de Kissinger se enfoca principalmente en el cálculo de la energía de activación aparente ya que es un modelo que no necesita conocer el modelo de reacción, generalmente es utilizado para verificar la energía de activación obtenida por otros métodos (Liu et al., 2018, p. 10). La tabla 9-3 muestra los resultados de las energías de activación, el coeficiente de correlación R^2 es superior a 0,98 y tiende a aumentar en las etapas intermedias correspondiente al proceso de degradación polimérica. De acuerdo a los resultados obtenidos por Wang & Zhao (2015, p. 6), quien señala un rango del grado de avance de 10-70 %, del que se obtuvo una energía de activación de $181,82 \frac{\text{KJ}}{\text{mol}}$, además el factor pre exponencial fue de $20,15 \text{ s}^{-1}$ con un grado de correlación de 0,998. El buen ajuste lineal y la comparación de los resultados con literatura sugiere que el método de Kissinger describe de forma correcta el proceso de degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*).

3.1.6 Modelo propuesto

De acuerdo a los modelos cinéticos evaluados se observa en la tabla 9-3 que el coeficiente de correlación lineal en las dos tasas de calentamiento es muy cercano a uno, otros autores como Wang & Zhao (2015) ensayaron modelos cinéticos isoconversionales (Kissinger y Flynn-Wall-Ozawa) para la descripción del mecanismo de degradación térmica de guantes de goma de uso médico desechados que en mayor porcentaje están conformados por látex natural, en dicho estudio el método de Kissinger es el que mejor se ajusta a los datos ($R^2 = 0,9987$), por lo que se tomara en consideración como método experimental para validación estadística

La tercera etapa resulta de mayor interés en este estudio a distintas tasas de calentamiento ya corresponde a la degradación polimérica del poliisopreno, a su vez coincide con el pico máximo de grado de avance de la reacción como se muestra en el gráfico 63-3.

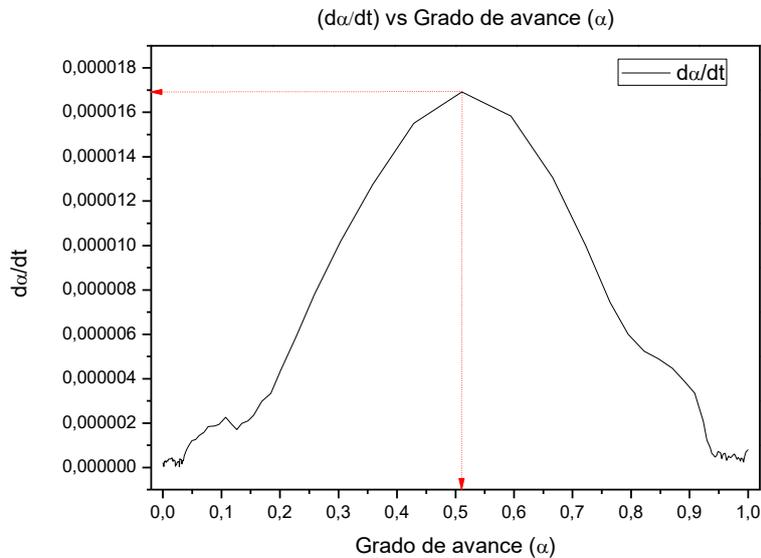


Gráfico 63-3. Representación de $\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)$ vs el Grado de avance (α)

Realizado por: Peña Elvis, 2021

Dado que se busca minimizar en lo máximo posible los errores en el cálculo del modelo experimental se propone un ensayo que permita un mejor ajuste cinético de energía de activación (E_a) y factor pre exponencial (A), por ello que se alcanza un factor de correlación igual a 1 ya que se realiza un ajuste de funciones por mínimos cuadrados es decir se tienen valores ideales, pudiéndose recalcular la temperatura con el fin de establecer el modelo cinético adecuado.

Mediante el uso de un software Statgraphics en su versión demo, se estableció el procesamiento de datos, además se realizan los ajustes necesarios al modelo experimental y se obtiene la temperatura calculada del proceso de degradación térmica, representada por la ecuación siguiente:

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = A e^{\left[-\frac{E_a}{R.T}\right]}. (1 - \alpha)^n$$

La tabla 10-3 muestra los parámetros obtenidos al realizar el ajuste del modelo propuesto donde se muestra que la similitud es notable. Por lo tanto, el modelo cinético propuesto representa correctamente el proceso de degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*).

Tabla 10-3. Parámetros cinéticos experimentales y calculados

Modelo cinético	n	E_a (KJ/mol)	A (s^{-1})	Ecuación cinética
$\beta = 5 \text{ }^\circ\text{C/min}$				

Experimental	1	182,760	19,234	$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = 19,234 e^{\left[-\frac{182,860}{R.T}\right]}.(1 - \alpha)$
Propuesto		180,967	16,428	$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = 16,428 e^{\left[-\frac{179,867}{R.T}\right]}.(1 - \alpha)$
$\beta= 15\text{ }^{\circ}\text{C/min}$				
Experimental	1	179,360	18,174	$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) 18,174 e^{\left[-\frac{178,360}{R.T}\right]}.(1 - \alpha)$
Propuesto		176,836	16,467	$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) 16,467 e^{\left[-\frac{176,836}{R.T}\right]}.(1 - \alpha)$

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

3.1.6.1 Validación estadística del modelo cinético propuesto

Es fundamental el ajuste y validación del modelo matemático para minimizar errores en la estimación de los parámetros estudiados en el modelo experimental y propuesto, es por ello que se realiza una comparación partiendo de un análisis multivariado el cual muestra que no existe una diferencia significativa estadísticamente entre los datos experimentales y los datos calculados para el modelo propuesto.

Tabla 11-3. Resumen estadístico para la etapa 3 con $\beta=5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$

	TEMPERATURA EXPERIMENTAL	TEMPERATURA CALCULADA
Recuento	20	20
Promedio	639,4	639,268
Desviación Estándar	34,5105	34,4599
Coefficiente de Variación	5,39732%	5,39052%
Mínimo	583,983	583,032
Máximo	694,817	693,653
Rango	110,834	110,62
Sesgo Estandarizado	0	-0,0759005
Curtosis Estandarizada	-1,09544	-1,09516

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Tabla 12-3. Resumen estadístico para la etapa 3 con $\beta=15\text{ }^{\circ}\text{C/min}$

	TEMPERATURA EXPERIMENTAL	TEMPERATURA CALCULADA
Recuento	20	20

Promedio	649,15	649,287
Desviación Estándar	35,4965	35,458
Coefficiente de Variación	5,46815%	5,46106%
Mínimo	592,15	591,375
Máximo	706,15	705,201
Rango	114,0	113,827
Sesgo Estandarizado	0	-0,0795744
Curtosis Estandarizada	-1,09545	-1,0949

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Las tablas 11-3 y 12-3 muestran el resumen estadístico para cada una de las variables de temperatura experimental y calculada con tasas de calentamiento de 5 y 15 °C/min respectivamente, mismas que incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. en este caso, los datos obtenidos muestran valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada dentro del rango esperado.

Tabla 13-3. Intervalos de confianza del 95 % para la tercera etapa con $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Variable	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
TEMPERATURA EXPERIMENTAL	639,4	7,71678	623,249	655,551
TEMPERATURA CALCULADA	639,268	7,70547	623,141	655,396

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

Tabla 14-3. Intervalos de confianza del 95 % para la tercera etapa con $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

Variable	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
TEMPERATURA EXPERIMENTAL	649,15	7,93725	632,537	665,763
TEMPERATURA CALCULADA	649,287	7,92864	632,692	665,882

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

En las tablas 13-3 y 14-3 se muestran intervalos de confianza del 95,0% para las medias y desviaciones estándar de cada una de las variables. Estos intervalos acotan el error de muestreo

en los estimados de los parámetros de las poblaciones de las cuales provienen los datos. Los intervalos asumen que las poblaciones de las cuales provienen las muestras pueden ser representadas por distribuciones normales. Mientras que los intervalos de confianza para las medias son bastante robustos y no muy sensibles a violaciones de este supuesto, los intervalos de confianza para las desviaciones estándar son muy sensibles.

CONCLUSIONES

- A través de caracterización de la muestra de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) se determinaron propiedades fisicoquímicas, la prueba FTIR mostro picos característicos del isopreno en el rango de $839,85-1646\text{ cm}^{-1}$, lo cual corresponde las estiramiento del doble enlace $C = C$ del biopolímero, además de otras bandas que pertenecen a pequeñas sustancias proteicas, lípidos y agua presentes en la muestra. La capacidad energética que determina la energía disponible del látex natural expresada en términos de poder calorífico superior el cual se estableció en $29,88\frac{MJ}{Kg}$. Finalmente, el análisis inmediato revelo que el contenido de volátiles en la muestra fue del 82,39 %, el 9,27 % de carbono fijo, 4,51 % de cenizas y 3,83 % de contenido de humedad.
- Se realizó el análisis termogravimétrico a la muestra de látex natural (*Hevea Brasiliensis*) considerando tasas de calentamiento de 5 y 15 °C/min en atmosfera inerte y un rango de temperatura de (25-600) °C. Las curvas TGA y DTG revelaron que la muestra tiende a perder peso significativamente en el rango de temperatura de 310-421 °C, la temperatura máxima de degradación fue 363 °C para la primera tasa de calentamiento y para la segunda se obtuvo un intervalo de 319-433 °C, con una temperatura máxima de degradación establecida en 379 °C. Los resultados obtenidos muestran que a curva DTG se mueve hacia una temperatura más alta con el aumento de la tasa de calentamiento y el cambio de temperatura fue de 16 °C.
- Dado que los métodos isoconversionales se ajustan de mejor manera a los datos obtenidos en el análisis termogravimétrico (TGA), se estableció al método de Kissinger como el método adecuado para la degradación térmica del látex natural (*Hevea Brasiliensis*). A partir del uso de este método se determinaron parámetros cinéticos experimentales, a los que se realizó un recalcu y posterior ajuste de las temperaturas en la etapa polimérica, se obtuvo una energía de activación de $E_a=180,967\frac{KJ}{mol}$, en el pico más alto $T= 363,33\text{ °C}$ y un factor pre exponencial $A=16,428\text{ s}^{-1}$. Así mismo se obtuvo una energía de activación de $E_a=176,836\frac{KJ}{mol}$, en el pico más alto $T= 379\text{ °C}$ y un factor pre exponencial $A=16,467\text{ s}^{-1}$, para las tasas de calentamiento de 5 y 15 °C/min respectivamente.

RECOMENDACIONES

- Llevar a cabo investigaciones con otras variedades de la especie *Hevea Brasiliensis* ya que pueden variar las propiedades y los resultados de acuerdo a la región de donde provengan las muestras.
- Variar el tamaño de partícula de la muestra de látex natural con la finalidad de demostrar la dependencia de la cinética con el tamaño de partícula.
- Ampliar el estudio mediante la propuesta de diseño experimental y construcción de un equipo de pirólisis térmica que aproveche este biopolímero en la obtención de combustibles de tercera generación, además de caracterizar los productos de acuerdo a su punto de ebullición y composición química.

BIBLIOGRAFÍA

AHMAD, N.; et al. "Potential use of natural rubber to produce liquid fuels using hydrous pyrolysis-a review". *RSC Advances* [en línea], 2016, (Malasia) vol. 6, no. 73, pp. 68906-68921. [Consulta: 20 de enero 2021] ISSN 20462069. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/c6ra09085k>.

AHMAD, N.; et al. "Synthesis of liquid fuel through hydrothermal conversion of natural rubber". *AIP Conference Proceedings* [en línea], 2019, (Malasia) vol. 2168, pp. 9. [Consulta: 20 de enero 2021]. ISSN 15517616. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/1.5132485> Published.

AHMAD, N.; et al. "Liquefaction of natural rubber to liquid fuels via hydrous pyrolysis". *Fuel* [en línea], 2018, (Malasia) vol. 218, pp. 227-235. [Consulta: 20 de enero 2021] ISSN 00162361. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.117>.

AHMAD, N.; et al. "Synthesis of valuable intermediate products from natural rubber under supercritical alcohol conditions". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], 2019, (Malasia) vol. 139, pp. 196-204. [Consulta: 20 de enero 2021]. ISSN 01652370. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.02.004>.

ARCONEL. *Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2017*, 2017, [Consulta: 17 de febrero 2021]. Disponible en: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/10/estadistica-reducida.pdf>.

CÁCERES, A. & GAUTHIER, P. "Análisis termogravimétrico como un nuevo método para la determinación de contenido de sólidos totales (CST) y caucho seco (CCS) del látex natural". *Revista ION* [en línea], 2012, (Colombia) vol. 25, no. 2, pp. 57-65. [Consulta: 29 de julio 2020]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rion/v25n2/v25n2a07.pdf>.

ÇEPELIOĞULLAR, Ö.; et al. "Activation energy prediction of biomass wastes based on different neural network topologies". *Fuel* [en línea], 2018, (Turquía) vol. 220, pp. 535-545. [Consulta: 26 de octubre 2020]. ISSN 00162361. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.045>.

CHEN, N.; et al. "Kinetics of coffee industrial residue pyrolysis using distributed activation energy model and components separation of bio-oil by sequencing temperature-raising pyrolysis". *Bioresource Technology* [en línea], 2016, (China) vol. 221, pp. 534-540. [Consulta: 29 de julio 2020]. ISSN 18732976. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.062>.

ESPINOZA, E. Estudio cinético por análisis termogravimétrico en la degradación térmica en residuos de cáscara de naranja, generados en el cantón Caluma (Trabajo de titulación) (Tercer nivel). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de ciencias, Escuela de Ingeniería Química. (Riobamba-Ecuador), 2020. pp.70.

FERMOSO, J. & MAŠEK, O. "Thermochemical decomposition of coffee ground residues by TG-MS: A kinetic study". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], 2018, (España) vol. 130, pp. 249-255. [Consulta: 16 de octubre 2020]. ISSN 01652370. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.12.007>.

FERNÁNDEZ-BERRIDI, M.; et al. "Pyrolysis-FTIR and TGA techniques as tools in the characterization of blends of natural rubber and SBR". *Thermochimica Acta* [en línea], 2006, (España) vol. 444(1), pp. 65-70. [Consulta: 15 de octubre 2020]. ISSN 00406031. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.02.027>.

FIACO, J. Evaluación de modelos de degradación de polímeros basados en la lignina (Trabajo de titulación) (Maestría) UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, España, 2011. pp. 147.

FIERRO, G. Reciclaje mecano-químico de desechos de látex de caucho natural vulcanizado (Trabajo de titulación) (Tercer nivel). [en línea]. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria. (Quito-Ecuador). 2016. pp. 113. [Consulta: 29 de julio 2020]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16694>.

GAD CALUMA. *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Caluma 2014 - 2020*, [en línea], 2019, (Ecuador) 1° Edición. Disponible en: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/0260001060001_DIAGNÓSTICO DEL PDOT CANTÓN CALUMA_13-01-2015_11-11-29.pdf.

HAPUARACHCHI, S.; et al. "Biodegradation of natural rubber latex by a novel bacterial species isolated from soil". *2ª Conferencia Internacional de Investigación en Ingeniería de Moratuwa, MERCon 2016* [en línea], 2016, (Sri Lanka) pp. 293-296. [Consulta: 29 de julio 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/MERCon.2016.7480156>.

HAYEEMASAE, N.; et al. "Kinetic of thermal degradation and thermal stability of natural rubber filled with titanium dioxide nanoparticles". *Polymer Composites* [en línea], 2019, (Tailandia) vol. 40(8), pp. 3149-3155. [Consulta: 02 de marzo 2021]. ISSN 15480569. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/PC.25163>.

HOSSEINPOUR, S.; et al. "Estimation of biomass higher heating value (HHV) based on the proximate analysis by using iterative neural network-adapted partial least squares (INNPLS)".

Energy [en línea], 2017, (Iran) vol. 138, pp. 473-479. [Consulta: 03 de marzo 2021]. ISSN 03605442. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.075>.

HUANG, Y.; et al. "Nonisothermal torrefaction kinetics of sewage sludge using the simplified distributed activation energy model". *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL* [en línea], 2016, (China) vol. 298, pp. 154-161. [Consulta: 29 de julio 2020] ISSN 1385-8947. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.018>.

LAH, B.; et al. "Pyrolysis of natural, butadiene, styrene-butadiene rubber and tyre components: Modelling kinetics and transport phenomena at different heating rates and formulations". *Chemical Engineering Science* [en línea], 2013, (Eslovenia) vol. 87, pp. 1-13. [Consulta: 15 de octubre 2020] ISSN 00092509. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2012.10.003>.

LIU, S.; et al. "Rubber pyrolysis: Kinetic modeling and vulcanization effects". *Energy* [en línea], 2018, (China) vol. 155, pp. 215-225. [Consulta: 23 de febrero 2021] ISSN 03605442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.04.146>.

MALLICK, D.; et al. "A comprehensive kinetic analysis of bamboo waste using thermogravimetric analysis". *2018 2nd International Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE)* [en línea], 2018, (India) pp. 6. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/EPETSG.2018.8658672>.

MAYOL, A.; et al. "Application of Artificial Neural Networks in prediction of pyrolysis behavior for algal mat (LABLAB) biomass". *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)* [en línea], 2018, (Filipinas). [Consulta: 29 de julio 2020] pp. 5. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/HNICEM.2018.8666376>.

MEDEIROS, E.; et al. "A comparative study of the non-isothermal degradation of natural rubber from Mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes) and Seringueira (*Hevea brasiliensis*)". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [en línea], 2009, (Hungría) vol. 100(3), pp. 1045-1050. [Consulta: 15 de octubre 2020]. ISSN 13886150. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10973-009-0477-6>.

MEZA, I. & DE LATORRE, E. "Modelo de Deconvolución para la Cuantificación de los Componentes del Caucho Vulcanizado Presente en los Neumáticos Fuera de Uso". *Revista Politécnica* [en línea], 2015, (Ecuador) vol. 36(2), pp. 7. [Consulta: 29 de julio 2020]. Disponible en: <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsbas&AN=edsbas.541FF9A7&lang=es&site=eds-live>.

MITIE & YU, X. "The Pyrolysis Characteristics of Four kinds of Agri-Forestry Biomass Waste". *Conferencia Internacional sobre E-Product E-Service y E-Entertainment, ICEEE2010* [en línea], 2010, (China) pp. 4. [Consulta: 29 de julio 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICEEE.2010.5660333>.

MORENO, R.; et al. "Thermogravimetric studies of decomposition kinetics of six different IAC Hevea rubber clones using Flynn-Wall-Ozawa approach". *Plastics, Rubber and Composites* [en línea], 3003, (Brasil) vol. 35(1), pp. 15-21. [Consulta: 20 de enero 2021] ISSN 14658011. Disponible en: <https://doi.org/10.1179/174328906X79932>.

PENG, J.; et al. "Kinetic Analyses of Algae Pyrolysis". *Actas del ICAE 2011: Conferencia Internacional 2011 sobre Nuevas Tecnologías de la Ingeniería Agrícola* [en línea], 2011, (China) pp. 692-695. [Consulta: 29 de julio 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/ICAE.2011.5943890>.

PINHEIRO, L. Desenvolvimento e caracterização de biocompósito de látex (borracha natural) e fibra de carnaúba (Trabajo de titulación) (Maestría). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. (Rio Grande-Brasil). 2015.pp. 69.

RAZA, S.; et al. "Pyrolysis of high-ash sewage sludge : Thermo-kinetic study using TGA and artificial neural networks". *Fuel* [en línea], 2018, (Pakistan) vol. 233, pp. 529-538. [Consulta: 29 de julio 2020]. ISSN 0016-2361. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.06.089>.

RODRÍGUEZ, L. Estudio de factibilidad para la producción de caucho "Hevea brasiliensis" en Quevedo, provincia de Los Ríos. (Trabajo de titulación).(Tercer nivel) [en línea]. Universidad San Francisco de Quito. (Quito-Ecuador). 2009. pp. 74. [Consulta: 29 de julio 2020]. Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/956/1/94313.pdf>.

ROJEK, B.; et al. "Artificial neural networks as a supporting tool for compatibility study based on thermogravimetric data". *Thermochimica Acta* [en línea], 2018, (Polonia) vol. 659, pp. 222-231. [Consulta: 29 de julio 2020]. ISSN 0040-6031. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.12.015>.

SAMSURI, A. & ABDULLAHI, A. "Degradation of Natural Rubber and Synthetic Elastomers". *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [en línea], 2017, (Malasia), pp. 1-32. [Consulta: 15 de octubre 2020]. ISBN 9780128035818. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09212-2>.

SANTI, F. Actividad del ph de la solución de ácido orgánico en la obtención de chipas del látex del caucho (*hevea brasiliensis*) en la parroquia patricia pilar (Trabajo de titulación). (Tercer nivel) [en línea]. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Ingeniería,

(Quevedo-Ecuador). 2014. pp. 120. [Consulta: 01 de octubre 2020]. Disponible en: <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/245>.

SOH, M.; et al. "Comprehensive Kinetic Study on the Pyrolysis and Combustion Behaviours of Five Oil Palm Biomass by Thermogravimetric-Mass Spectrometry (TG-MS) Analyses". *Bioenergy Research* [en línea], 2019, (Malasia) vol. 12(2), pp. 370-387. [Consulta: 23 de febrero 2021]. ISSN 19391242. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09974-9>.

STRASZKO, J.; et al. "Application of artificial neural networks in oxidation kinetic analysis of nanocomposites". *Polish Journal of Chemical Technology* [en línea], 2008, (Polonia) vol. 10(3), pp. 21-28. [Consulta: 29 de julio 2020]. ISSN 18994741. Disponible en: <https://doi.org/10.2478/v10026-008-0031-5>.

TAMRI, Z.; et al. "The effect of temperature, heating rate, initial cross-linking and zeolitic catalysts as key process and structural parameters on the degradation of natural rubber (NR) to produce the valuable hydrocarbons". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [en línea], 2018, (Iran) vol. 134, pp. 35-42. [Consulta: 15 de octubre 2020]. ISSN 01652370. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.05.001>.

TYNG, J.; et al. "Artificial neural network approach for co-pyrolysis of *Chlorella vulgaris* and peanut shell binary mixtures using microalgae ash catalyst". *Energy* [en línea], 2020, (Malasia) vol. 207, pp. 16. [Consulta: 29 de julio 2020]. ISSN 0360-5442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118289>.

WANG, J. & ZHAO, H. "Thermogravimetric analysis of rubber glove pyrolysis by different Iso-conversional methods". *Waste and Biomass Valorization* [en línea], 2015, (China) vol. 6, no. 4, pp. 527-533. [Consulta: 23 de febrero 2021]. ISSN 1877265X. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-015-9372-5>.

WEI, X.; et al. "Studying the mechanisms of natural rubber pyrolysis gas generation using RMD simulations and TG-FTIR experiments". *Energy Conversion and Management* [en línea], 2019, (China) vol. 189, pp. 143-152. [Consulta: 15 de octubre 2020]. ISSN 01968904. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.03.069>.

XING, J.; et al. "A comprehensive study on estimating higher heating value of biomass from proximate and ultimate analysis with machine learning approaches". *Energy* [en línea], 2019, (China) vol. 188, pp. 116077. [Consulta: 03 de marzo 2021]. ISSN 03605442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116077>.

YANG, Q.; et al. "Gas products generation mechanism during co-pyrolysis of styrene-butadiene rubber and natural rubber". *Journal of Hazardous Materials* [en línea], 2020, (China) vol. 401,

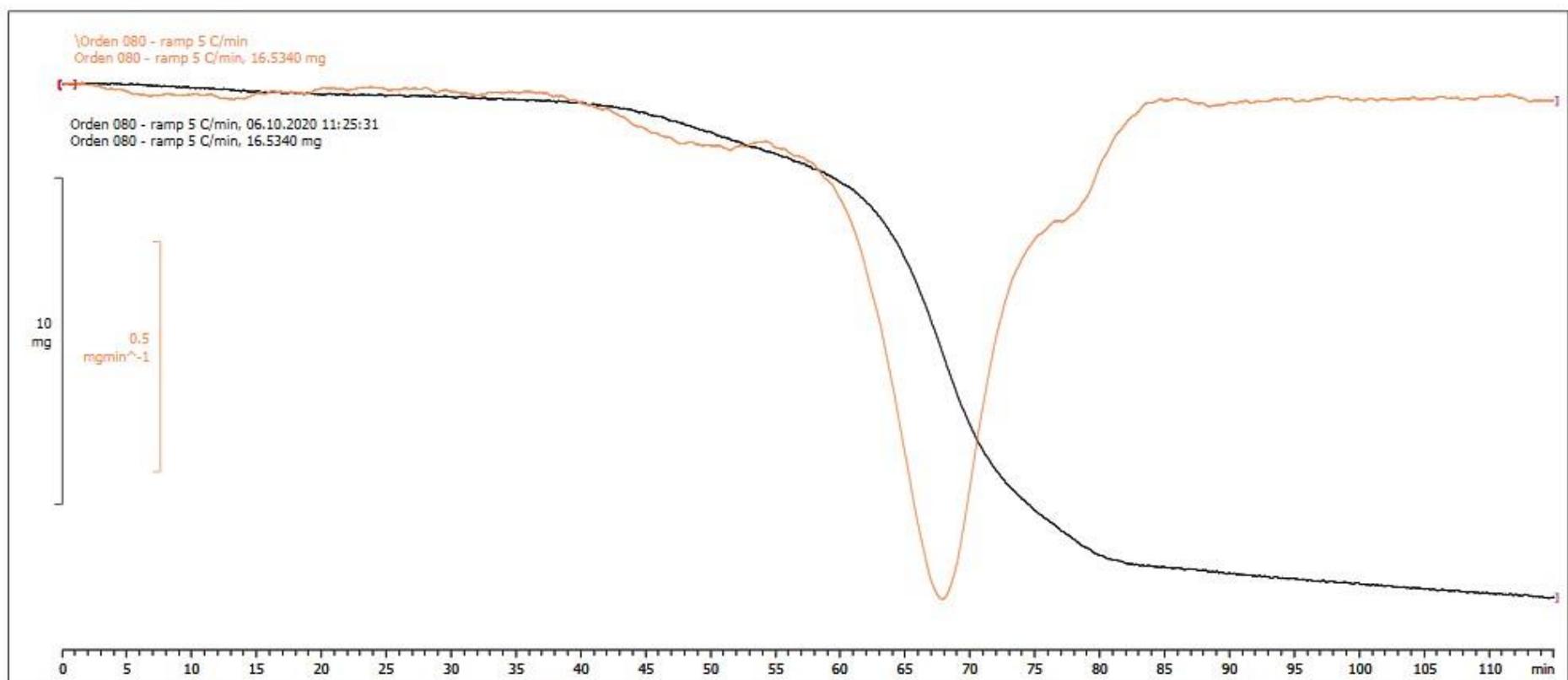
pp. 11. [Consulta: 15 de octubre 2020]. ISSN 18733336. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123302>.

ZAPATA, N. & ÁLVAREZ, M. "evaluación de las variedades de látex de caucho natural colombiano IAN 710, IAN 873 y FX 3864". *Revista colombiana de materiales* [en línea], 2017, (Colombia) vol. 11 pp. 8-11. [Consulta: 29 de julio 2020]. ISSN 2256-1013. Disponible en: <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/328781>

ZHANG, X.; et al. "Combustion Characteristic of Commercial Flame-Retardant Natural Rubber Under Low Oxygen Atmosphere". *Fire Technology* [en línea], 2019, (China) vol. 55, no. 5, pp. 1691-1705. [Consulta: 23 de febrero 2021]. ISSN 15728099. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00826-8>.

ANEXOS

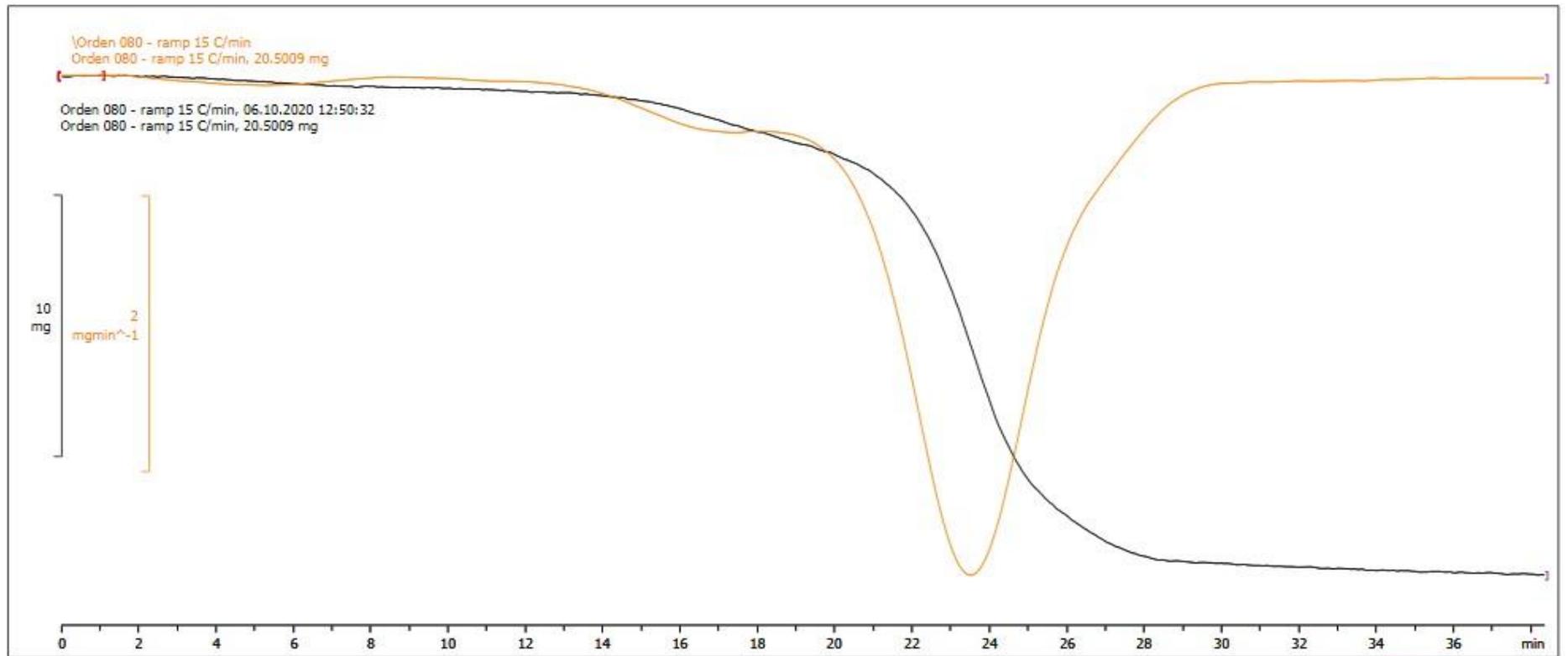
ANEXO A. Estudio termogravimétrico para $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$



Lab: METTLER

STAR[®] SW 13.00

ANEXO B. Estudio termogravimétrico para $\beta=15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$



Lab: METTLER

STAR^e SW 13.00

ANEXO C. Datos cinéticos obtenidos del estudio termogravimétrico

- *Rampa 1: $\beta=5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$*

TIEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)	MASA(mg)	GRADO DE AVANCE (α)	mg/s
0	25	16,562	0	0
70	30,8333	16,5452	0,001062232	0,23636
140	36,6667	16,5403	0,00137205	0,118145
210	42,5	16,5378	0,00153012	0,07875143
280	48,3333	16,534	0,001770387	0,05905
350	54,1667	16,5221	0,002522802	0,047206
420	60	16,4921	0,004419645	0,0392669
490	65,8333	16,4773	0,005355421	0,03362714
560	71,6667	16,4578	0,006588369	0,02938893
630	77,5	16,4322	0,008207009	0,02608286
700	83,3333	16,4145	0,009326146	0,02344929
770	89,1667	16,3762	0,011747783	0,02126779
840	95	16,354	0,013151447	0,01946905
910	100,833	16,3175	0,015459273	0,01793132
980	106,667	16,2872	0,017375085	0,01661959
1050	112,5	16,2754	0,018121177	0,01550038
1120	118,333	16,2335	0,020770435	0,0144942
1190	124,167	16,2292	0,021042315	0,01363798
1260	130	16,2221	0,021491235	0,01287468
1330	135,833	16,2215	0,021529172	0,01219662
1400	141,667	16,2106	0,022218358	0,011579
1470	147,5	16,2067	0,022464948	0,01102497
1540	153,333	16,1919	0,023400724	0,01051422
1610	159,167	16,188	0,023647314	0,01005466
1680	165	16,1616	0,025316536	0,00962
1750	170,833	16,1537	0,025816038	0,00923069
1820	176,667	16,1189	0,028016376	0,00885654
1890	182,5	16,1177	0,02809225	0,00852788
1960	188,333	16,1146	0,028288257	0,00822173
2030	194,167	16,1077	0,028724531	0,00793483
2100	200	16,0552	0,032044007	0,00764533
2170	205,833	16,0541	0,032113558	0,0073982
2240	211,667	16,0302	0,03362471	0,00715634
2310	217,5	16,0065	0,035123216	0,00692922
2380	223,333	15,9853	0,036463652	0,00671651
2450	229,167	15,927	0,040149851	0,00650082

2520	235	15,863	0,04419645	0,00629484
2590	240,833	15,7738	0,049836397	0,00609027
2660	246,667	15,676	0,056020107	0,00589323
2730	252,5	15,58	0,062090005	0,00570696
2800	258,333	15,4528	0,070132621	0,00551886
2870	264,167	15,336	0,077517664	0,00534355
2940	270	15,1668	0,088215861	0,00515878
3010	275,833	15,0472	0,095777943	0,00499907
3080	281,667	14,8671	0,107165326	0,00482698
3150	287,5	14,6961	0,117977333	0,00466543
3220	293,333	14,5667	0,12615905	0,00452382
3290	299,167	14,4321	0,134669554	0,00438666
3360	305	14,2586	0,145639631	0,00424363
3430	310,833	14,106	0,155288241	0,00411254
3500	316,667	13,8933	0,16873686	0,00396951
3570	322,5	13,6451	0,184430078	0,00382216
3640	328,333	13,3768	0,20139418	0,00367495
3710	334,167	12,9673	0,227286091	0,00349523
3780	340	12,4655	0,259013958	0,00329775
3850	345,833	11,7594	0,303659327	0,00305439
3920	351,667	10,8866	0,358844822	0,00277719
3990	357,5	9,78258	0,428649922	0,00245177
4060	363,333	8,48285	0,510829395	0,00208937
4130	369,167	7,1599	0,594477024	0,00173363
4200	375	6,02874	0,665998135	0,00143541
4270	380,833	5,13634	0,722422901	0,00120289
4340	386,667	4,48005	0,763918878	0,00103227
4410	392,5	3,9834	0,79532112	0,00090327
4480	398,333	3,5517	0,822616695	0,00079279
4550	404,167	3,17185	0,846633893	0,00069711
4620	410	2,79208	0,870646033	0,00060435
4690	415,833	2,4788	0,890454136	0,00052853
4760	421,667	2,18735	0,908881969	0,00045953
4830	427,5	1,95935	0,923297978	0,00040566
4900	433,333	1,8632	0,929377361	0,00038024
4970	439,167	1,76895	0,935336611	0,00035593
5040	445	1,7254	0,938090195	0,00034234
5110	450,833	1,672	0,941466576	0,0003272
5180	456,667	1,64179	0,943376697	0,00031695
5250	462,5	1,6003	0,946000032	0,00030482
5320	468,333	1,5595	0,948579739	0,00029314
5390	474,167	1,488	0,953100549	0,00027607
5460	480	1,459	0,954934164	0,00026722
5530	485,833	1,42625	0,957004884	0,00025791
5600	491,667	1,3666	0,960776441	0,00024404

5670	497,5	1,3275	0,96324866	0,00023413
5740	503,333	1,31775	0,963865134	0,00022957
5810	509,167	1,27042	0,966857721	0,00021866
5880	515	1,23765	0,968929706	0,00021048
5950	520,833	1,20155	0,971212241	0,00020194
6020	526,667	1,16715	0,973387288	0,00019388
6090	532,5	1,11805	0,976491788	0,00018359
6160	538,333	1,07265	0,979362344	0,00017413
6230	544,167	1,0461	0,981041051	0,00016791
6300	550	1,0162	0,982931571	0,0001613
6370	555,833	0,97685	0,985419598	0,00015335
6440	561,667	0,95535	0,986779002	0,00014835
6510	567,5	0,93315	0,988182666	0,00014334
6580	573,333	0,89055	0,990876184	0,00013534
6650	579,167	0,87515	0,991849896	0,0001316
6720	585	0,85305	0,993247238	0,00012694
6790	590,833	0,80845	0,996067211	0,00011906
6860	596,667	0,74625	1	0,00010878

Realizado por: Peña, Elvis, 2021

- Rampa 2: $\beta = 15 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$

TIEMPO (s)	TEMPERATURA (°C)	MASA(mg)	GRADO DE AVANCE (α)	mg/s
0	25	20,526	0	0
24	31	20,5162	0,000515043	0,85484167
48	37	20,5134	0,000662198	0,4273625
72	43	20,5066	0,001019574	0,28481389
96	49	20,5009	0,00131914	0,21355104
120	55	20,4912	0,001828927	0,17076
144	61	20,4863	0,002086448	0,14226597
168	67	20,4724	0,002816968	0,12185952
192	73	20,438	0,004624873	0,10644792
216	79	20,4322	0,004929694	0,09459352
240	85	20,388	0,007252642	0,08495
264	91	20,3548	0,00899748	0,07710152
288	97	20,32	0,010826407	0,07055556
312	103	20,302	0,011772404	0,06507051
336	109	20,2443	0,014804849	0,06025089
360	115	20,206	0,01681772	0,05612778
384	121	20,2007	0,017096263	0,05260599
408	127	20,1454	0,020002575	0,04937598

432	133	20,123	0,021179816	0,04658102
456	139	20,1157	0,02156347	0,04411338
480	145	20,0773	0,023581596	0,04182771
504	151	20,0769	0,023602618	0,03983512
528	157	20,0702	0,023954739	0,03801174
552	163	20,0673	0,02410715	0,0363538
576	169	20,0472	0,025163513	0,03480417
600	175	20,0398	0,025552423	0,03339967
624	181	20,0128	0,026971418	0,03207179
648	187	20,0073	0,027260472	0,03087546
672	193	19,9762	0,028894944	0,02972649
696	199	19,9655	0,029457287	0,02868606
720	205	19,9258	0,031543735	0,02767472
744	211	19,9	0,032899664	0,02674731
768	217	19,8621	0,034891513	0,02586211
792	223	19,8606	0,034970346	0,02507652
816	229	19,8146	0,037387893	0,0242826
840	235	19,7482	0,04087757	0,02350976
864	241	19,6855	0,044172792	0,02278414
888	247	19,605	0,048403499	0,0220777
912	253	19,5272	0,052492307	0,0214114
936	259	19,3933	0,059529472	0,02071934
960	265	19,2535	0,066876713	0,02005573
984	271	19,057	0,077203844	0,01936687
1008	277	18,9055	0,085165983	0,01875546
1032	283	18,7179	0,095025371	0,0181375
1056	289	18,5501	0,103844163	0,01756638
1080	295	18,3716	0,113225297	0,01701074
1104	301	18,2173	0,121334591	0,01650118
1128	307	18,034	0,130967991	0,01598759
1152	313	17,8888	0,138599031	0,01552847
1176	319	17,6927	0,14890514	0,01504481
1200	325	17,4957	0,159258549	0,01457975
1224	331	17,2453	0,172418414	0,0140893
1248	337	16,9548	0,18768575	0,01358558
1272	343	16,555	0,208697389	0,01301494
1296	349	16,0279	0,236399326	0,01236721
1320	355	15,3246	0,273361521	0,01160955
1344	361	14,383	0,32284766	0,01070164
1368	367	13,0976	0,390402338	0,00957427
1392	373	11,5725	0,470554538	0,00831358
1416	379	9,80455	0,563469811	0,00692412
1440	385	8,07774	0,654222956	0,00560954
1464	391	6,6234	0,730656338	0,00452418
1488	397	5,52244	0,788517702	0,00371132

1512	403	4,74755	0,829242335	0,00313991
1536	409	4,17924	0,85911008	0,00272086
1560	415	3,71805	0,883348093	0,00238337
1584	421	3,28159	0,906286411	0,00207171
1608	427	2,91593	0,925503809	0,00181339
1632	433	2,59485	0,942378288	0,00158998
1656	439	2,3563	0,954915373	0,00142289
1680	445	2,18215	0,964067891	0,0012989
1704	451	2,04173	0,971447717	0,0011982
1728	457	2,00971	0,97313054	0,00116303
1752	463	1,957	0,975900733	0,00111701
1776	469	1,93995	0,976796803	0,00109231
1800	475	1,91265	0,978231564	0,00106258
1824	481	1,86095	0,980948677	0,00102026
1848	487	1,83375	0,982378183	0,00099229
1872	493	1,82735	0,982714538	0,00097615
1896	499	1,7888	0,984740547	0,00094346
1920	505	1,76865	0,985799538	0,00092117
1944	511	1,75405	0,986566846	0,00090229
1968	517	1,7143	0,988655923	0,00087109
1992	523	1,70795	0,988989649	0,0008574
2016	529	1,69065	0,989898857	0,00083862
2040	535	1,64825	0,992127205	0,00080797
2064	541	1,63442	0,992854046	0,00079187
2088	547	1,6299	0,993091596	0,0007806
2112	553	1,60395	0,994455408	0,00075945
2136	559	1,5811	0,995656298	0,00074022
2160	565	1,5502	0,997280259	0,00071769
2184	571	1,54655	0,997472087	0,00070813
2208	577	1,5463	0,997485225	0,00070032
2232	583	1,51745	0,999001448	0,00067986
2256	589	1,504	0,999708318	0,00066667
2280	595	1,49845	1	0,00065721

Realizado por: Peña, Elvis, 2021



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

*DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL APRENDIZAJE
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y DOCUMENTAL*

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 06/05/2021

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Elvis Xavier Peña Medina
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Lic. Luis Caminos Vargas Mgs.



0762-DBRAI-UPT-2021