



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

TESIS

**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE MASA EN
MADERA DE ENCINO EN EL ESTADO DE OAXACA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

PACHECO BALTAZAR KARLA FERNANDA

ASESOR:

Dr. EMILIO HERNÁNDEZ BAUTISTA

COMISIÓN REVISORA:

Dr. IVÁN ANTONIO GARCÍA MONTALVO

M. en I. MARCO ANTONIO MALDONADO NÚÑEZ

M. en C. MARIO DÍAZ GONZÁLEZ

Resumen

El presente trabajo se constituye de tres primordiales partes, la experimentación y recopilación de datos para la construcción de cinéticas de desorción de tres tipos de madera: *Quercus laurina*. Humb. & Bonpl, *Pinus oaxacana*. Mirov y *Cedrela odorata*. L. obtenidas de distintas regiones del estado de Oaxaca; el cálculo de parámetros de los modelos de sorción seleccionados y la construcción de isotermas de desorción de los mismos modelos.

Los datos recopilados en la primera parte fueron resultado de una implementación del método gravimétrico @ 35 °C y 45 °C bajo la generación de seis HR distintas en un lapso de 75 y 39 días respectivamente. Es de este modo como a partir de dichos datos experimentales se llevó a cabo la construcción de cinéticas de desorción que permitieran la descripción y representación gráfica del proceso de liberación de moléculas o partículas adsorbidas desde una superficie sólida, así como su estabilización o variación con respecto al tiempo.

La segunda parte se enfocó en el cálculo y análisis de los parámetros de transporte de masa en la madera de encino, así como su respectivo desarrollo bajo los modelos de BET (Brunauer-Emmett-Teller) y GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) para caracterizar su comportamiento de desorción, es decir, la interacción entre la madera y la humedad en términos de área superficial, volumen de microporos y energía de adsorción. La aplicación de estos modelos permitió una mejor comprensión del fenómeno de desorción y proporcionó información valiosa sobre su capacidad de retención de humedad.

Por su parte en la última parte de nuestro trabajo se realizó la generación de las isotermas de desorción de humedad, las cuales representan la relación entre la humedad relativa y la humedad de equilibrio, de tal manera se obtuvieron curvas que son de relevancia en el diseño de sistemas de secado y almacenamiento adecuados.

Los resultados obtenidos a partir de la comparativa con dos tipos de madera diferentes y bajo distintas condiciones contribuyen al conocimiento de las propiedades de la madera de encino y pueden ser de utilidad para el procesamiento y uso eficiente en diversas aplicaciones industriales de la misma, esto debido a la importancia que posee dicho tipo de madera en el estado de Oaxaca.

Abstract

The present work consists of three main parts, the experimentation and data collection for the construction of desorption kinetics of three types of wood: *Quercus laurina*. Humb. & Bonpl, *Pinus oaxacana*. Mirov and *Cedrela odorata*. L obtained from different regions of the state of Oaxaca; the calculation of parameters of the selected sorption models and the construction of desorption isotherms of the same models.

The data collected in the first part were the result of an implementation of the gravimetric method @ 35 °C and 45 °C under the generation of six different RHs over a period of 75 and 39 days, respectively. Thus, based on these experimental data, desorption kinetics were constructed to allow the description and graphic representation of the release process of molecules or particles adsorbed from a solid surface, as well as their stabilization or variation with respect to time.

The second part focused on the calculation and analysis of mass transport parameters in oak wood, as well as their respective development under the BET (Brunauer-Emmett-Teller) and GAB (Guggenheim-Anderson-de Boer) models to characterize their desorption behavior, i.e., the interaction between wood and moisture in terms of surface area, micropore volume and adsorption energy. The application of these models allowed a better understanding of the desorption phenomenon and provided valuable information on its moisture retention capacity.

In the last part of our work, moisture desorption isotherms were generated, which represent the relationship between relative humidity and equilibrium humidity, thus obtaining curves that are relevant in the design of adequate drying and storage systems.

The results obtained from the comparison with two different types of wood and under different conditions contribute to the knowledge of the properties of oak wood and can be useful

for the processing and efficient use in various industrial applications, due to the importance of this type of wood in the state of Oaxaca.

Dedicatoria

A mi madre, porque toda fuerza mía es inspirada en ti y cada logro mío, es logro tuyo. Porque sin tu guía, paciencia, comprensión y amor este viaje y esta persona no hubiesen alcanzado su potencial.

“Muchas mujeres han realizado proezas, pero tú las superas todas”

Agradecimientos

A mi familia, por no escatimar en su amor y apoyo a lo largo de este proceso enseñándome así, que la perseverancia y dedicación vencen al talento nato.

Vanessa, por demostrarme que parte de la familia se elige, en ti encontré la sinceridad de dar sin esperar nada a cambio, gracias por estar todas las noches de desvelo y frustración, ya que es sencillo quedarse en días soleados, pero no en noches oscuras.

Josécito, porque tomaste lo existente y lo hiciste brillar; por darme un sorbo de vida que se ha convertido en algo que atesoro, te estuve buscando desde mil vidas atrás y por fin te encontré persona especial e infinitamente humana.

Asesor y profesores, por guiarme de la mejor manera compartiendo toda su experiencia, paciencia y amor; aprendizajes que disfruté mucho aplicar en todas las áreas de la que se convirtió en mi segunda casa y en más de una vez, mi casa de tiempo completo.

Índice general

Resumen.....	2
Abstract.....	4
Dedicatoria.....	6
Agradecimientos.....	7
Índice general	8
Índice de figuras.....	13
Capítulo I.....	22
1.1 Planteamiento	22
1.2 Antecedentes	24
1.3 Justificación.....	27
1.4 Delimitación del estudio.....	28
1.5 Objetivos	29
1.5.1 Objetivo general.....	29
1.5.2 Objetivos específicos	29
Capítulo II. Marco Teórico	30
2.1 Madera de encino	30
2.1.1 Quercus laurina Humb. & Bonpl.....	30
2.2 Estructura de la madera	32

2.2.1	Estructura microscópica.....	32
2.2.2	Estructura macroscópica	33
2.3	Interacción agua – madera.....	35
2.3.1	Actividad de agua	36
2.3.2	Contenido de humedad	36
	Humedad de equilibrio.....	37
2.3.3	Determinación de humedad en madera.....	38
2.3.4	Determinación de humedad relativa	39
2.4	Introducción a secado.....	41
2.4.1	Secado de madera	41
2.4.2	Tecnologías tradicionales.....	42
	Uso de aire caliente (convencional).....	43
	Secado al aire libre (natural).....	44
	Secado por deshumidificación.	45
	Secado solar.	46
2.4.3	Tecnologías emergentes.....	47
	Secado en vacío.....	47
	Secado por microondas (radiofrecuencias).....	48
2.5	Sorción y desorción en madera	49

2.5.1	Teorías de sorción	50
	Skaar.	50
	Hartley.....	51
	Engelund.	52
2.5.2	Isotermas de sorción	53
	Tipos de isoterma de sorción.	54
2.5.3	Regiones de sorción	57
2.5.4	Modelos de sorción	59
	Modelo Langmuir.	60
	Modelo Brunauer – Emmett – Teller (BET).....	60
	Modelo Guggenheim – Anderson – De Boer (GAB).	62
Capítulo III. Metodología.....		65
3.1	Materiales y equipo	65
3.2	Selección y preparación de las muestras	69
3.3	Diseño experimental.....	72
3.3.1	Recolección de datos de pesaje.....	74
3.3.2	Cálculo de contenido de humedad	80
Capítulo IV. Resultados y Análisis de resultados		90
4.1	Cinéticas de desorción.....	90

Cinéticas @ 35 °C.....	90
Cinéticas @ 45 °C.....	94
4.2 Isotermas de desorción	97
4.2.1 Isotermas BET	97
Isotermas @ 35 °C.....	99
Isotermas @ 45 °C.....	112
4.2.2 Isotermas GAB.....	124
Isotermas @ 35 °C.....	125
.....	137
Isotermas @ 45 °C.....	138
4.2.3 Análisis general de Isotermas de desorción @ 35 °C	148
Madera de encino.....	148
Madera de pino.	150
Madera de cedro.....	151
4.2.4 Análisis general de Isotermas de desorción @ 45 °C	152
Madera de encino.....	152
Madera de pino.	153
Madera de cedro.....	153
Capítulo V. Conclusión.....	155

Capítulo VI. Referencias	159
---------------------------------------	------------

Índice de figuras

Figura 1 Municipio de San Pedro Yolo, Oaxaca	31
Figura 2 Estructura macroscópica de madera	34
Figura 3 Horno para secado de madera	43
Figura 4 Secado de madera al aire libre.....	44
Figura 5 Cámara de deshumidificación para secado de madera.....	45
Figura 6 Secado solar.....	47
Figura 7 Secador de vacío.....	48
Figura 8 Secador de radiofrecuencia o microondas.....	49
Figura 9 Disposición de moléculas de agua en monocapa y multicapa.....	51
Figura 10 Formación de clusters en el proceso de sorción de madera	52
Figura 11 Clasificación de Isotermas de sorción	55
Figura 12 Regiones de Isoterma de sorción.....	58
Figura 13 Horno horizontal ECOSHEL Modelo: 9023A	66
Figura 14 Balanza analítica de precisión VELAB Modelo: VE – 204.....	67
Figura 15 Frasco de cristal a utilizar.....	68
Figura 16 Base trípode elaborada	68
Figura 17 Frascos resultantes.....	71
Figura 18 Muestras colocadas en el horno.....	72
Figura 19 Muestras de madera @ 55 °C.....	80
Figura 20 Cinéticas de desorción de madera de encino @ 35 °C y a diferentes humedades relativas (HR).....	90

Figura 21 Cinéticas de desorción de madera de pino @ 35 °C y a diferentes humedades relativas (HR)	91
Figura 22 Cinéticas de desorción de madera de cedro @ 35 °C y a diferentes humedades relativas (HR).....	93
Figura 23 Cinéticas de desorción de madera de encino @ 45 °C y a diferentes humedades relativas (HR).....	94
Figura 24 Cinéticas de desorción de madera de pino @ 45 °C y a diferentes humedades relativas (HR)	95
Figura 25 Cinéticas de desorción de madera de cedro @ 45 °C y a diferentes humedades relativas (HR).....	96
Figura 26 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de encino @ 35 °C	100
Figura 27 Isotherma de desorción simulada para madera de encino @ 35 °C	102
Figura 28 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de encino @ 35 °C.....	103
Figura 29 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de pino @ 35 °C	105
Figura 30 Isotherma de desorción simulada para madera de pino @ 35 °C.....	106
Figura 31 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de pino @ 35 °C	107
Figura 32 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de cedro @ 35 °C	109
Figura 33 Isotherma de desorción simulada para madera de cedro @ 35 °C	110

Figura 34 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de cedro @ 35 °C.....	111
Figura 35 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de encino @ 45 °C	113
Figura 36 Isotherma de desorción simulada para madera de encino @ 45 °C	114
Figura 37 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de encino @ 45 °C.....	115
Figura 38 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de pino @ 45 °C	117
Figura 39 Isotherma de desorción simulada para madera de pino @ 45 °C.....	118
Figura 40 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de pino @ 45 °C	119
Figura 41 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de cedro @ 45 °C	121
Figura 42 Isotherma de desorción simulada para madera de cedro @ 45 °C	122
Figura 43 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de cedro @ 45 °C.....	123
Figura 44 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de encino @ 35 °C	127
Figura 45 Isotherma de desorción simulada para madera de encino @ 35 °C	129
Figura 46 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de encino @ 35 °C.....	130

Figura 47 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de pino @ 35 °C	131
Figura 48 Isotherma de desorción simulada para madera de pino @ 35 °C.....	133
Figura 49 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de pino @ 35 °C.....	133
Figura 50 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de cedro @ 35 °C	135
Figura 51 Isotherma de desorción simulada para madera de cedro @ 35 °C.....	136
Figura 52 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de cedro @ 35 °C.....	137
Figura 53 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de encino @ 45 °C	138
Figura 54 Isotherma de desorción simulada para madera de encino @ 45 °C	140
Figura 55 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de encino @ 45 °C.....	140
Figura 56 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de pino @ 45 °C	142
Figura 57 Isotherma de desorción simulada para madera de pino @ 45 °C.....	143
Figura 58 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de pino @ 45 °C.....	144
Figura 59 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de cedro @ 45 °C	145
Figura 60 Isotherma de desorción simulada para madera de cedro @ 45 °C	147

Figura 61 Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de cedro

@ 45 °C..... 147

Índice de tablas

Tabla 1 Destino de Producción Forestal Maderable Por Estado y Grupo de Productos de Encino	30
Tabla 2 Características de <i>Quercus laurina</i> Humb & Bonpl.	31
Tabla 3 Clasificación de Isotermas de sorción conforme el Modelo de Blahovec y Yanniotis ..	57
Tabla 4 Sales adquiridas y Humedad Relativa (HR) correspondiente @ 35	69
Tabla 5 Sales adquiridas y Humedad Relativa (HR) correspondiente @ 45	69
Tabla 6 Intervalo de peso en muestras	70
Tabla 7 Experimentos de secado.....	72
Tabla 8 Pesaje de muestras de encino @ 35 °C en g	74
Tabla 9 Pesaje de muestras de pino @ 35 °C en g.....	75
Tabla 10 Pesaje de muestras de cedro @ 35 °C en g	76
Tabla 11 Pesaje de muestras de encino @ 45 °C en g	78
Tabla 12 Pesaje de muestras de pino @ 45 °C en g.....	78
Tabla 13 Pesaje de muestras de cedro @ 45 °C en g	79
Tabla 14 Muestras de madera @ 55 °C	81
Tabla 15 Determinación de humedad promedio @ 55 °C	81
Tabla 16 Datos de madera @ 35 °C.....	82
Tabla 17 Datos de madera @ 45 °C.....	82
Tabla 18 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de encino @ 35 °C.....	83
Tabla 19 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de pino @ 35 °C	84
Tabla 20 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de cedro @ 35 °C.....	85

Tabla 21 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de encino @ 45 °C	86
Tabla 22 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de pino @ 45 °C	87
Tabla 23 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de cedro @ 45 °C.....	88
Tabla 24 Contenido de humedad en equilibrio (CHE) de madera @ 35 °C	89
Tabla 25 Contenido de humedad en equilibrio (CHE) de madera @ 45 °C	89
Tabla 26 Datos de madera de encino @ 35 °C	99
Tabla 27 Datos finales de madera de encino @ 35 °C.....	101
Tabla 28 Comparativa Isoterma de BET experimental vs. Isoterma de BET simulada para madera de encino @ 35.....	103
Tabla 29 Datos de madera de pino @ 35 °C.....	104
Tabla 30 Datos finales de madera de pino @ 35 °C	105
Tabla 31 Comparativa Isoterma de BET experimental vs. Isoterma de BET simulada para madera de pino @ 35	107
Tabla 32 Datos de madera de cedro @ 35 °C	108
Tabla 33 Datos finales de madera de cedro @ 35 °C	109
Tabla 34 Comparativa Isoterma de BET experimental vs. Isoterma de BET simulada para madera de cedro @ 35	111
Tabla 35 Datos de madera de encino @ 45 °C	112
Tabla 36 Datos finales de madera de encino @ 45 °C.....	113
Tabla 37 Comparativa Isoterma de BET experimental vs. Isoterma de BET simulada para madera de encino @ 45.....	115
Tabla 38 Datos de madera de pino @ 45 °C.....	116
Tabla 39 Datos finales de madera de pino @ 45 °C	117

Tabla 40 Comparativa Isoterma de BET experimental vs. Isoterma de BET simulada para madera de pino @ 45	119
Tabla 41 Datos de madera de cedro @ 45 °C	120
Tabla 42 Datos finales de madera de cedro @ 45 °C	121
Tabla 43 Comparativa Isoterma de BET experimental vs. Isoterma de BET simulada para madera de cedro @ 45	123
Tabla 44 Datos de madera de encino @ 35 °C	126
Tabla 45 Datos finales de madera de encino @ 35 °C.....	128
Tabla 46 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de encino @ 35.....	130
Tabla 47 Datos de madera de pino @ 35 °C.....	131
Tabla 48 Datos finales de madera de pino @ 35 °C	132
Tabla 49 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de pino @ 35	134
Tabla 50 Datos de madera de cedro @ 35 °C	134
Tabla 51 Datos finales de madera de cedro @ 35 °C	135
Tabla 52 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de cedro @ 35	137
Tabla 53 Datos de madera de encino @ 45 °C	138
Tabla 54 Datos finales de madera de encino @ 45 °C.....	139
Tabla 55 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de encino @ 45.....	141
Tabla 56 Datos de madera de pino @ 45 °C.....	141

Tabla 57 Datos finales de madera de pino @ 45 °C	142
Tabla 58 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de pino @ 45	144
Tabla 59 Datos de madera de cedro @ 45 °C	145
Tabla 60 Datos finales de madera de cedro @ 45 °C	146
Tabla 61 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de cedro @ 45	148

Capítulo I

1.1 Planteamiento

En 2018 durante la conferencia “El rol de los bosques productivos y el comercio de los productos forestales en el desarrollo sostenible” se dio a conocer que México posee el 1er lugar en producción de chapa de madera de coníferas con 300, 000 m³, es decir 35% de la producción de América Latina y el Caribe, de igual manera se le atribuye el 3er lugar en producción de madera aserrada y triplay con 2.2 millones m³ y 185 mil m³ respectivamente. Y el 4to lugar en madera de rollo con 5.2 millones m³, de igual manera cabe recalcar que en 2016 México exportó un 60% del total de muebles de madera elaborados y exportados por países latinoamericanos y del Caribe, con una cantidad de 850 millones, esto según registros de la Comisión Nacional Forestal (2018).

Ahora bien, refiriéndonos en valores monetarios según datos del Censo Económico de 2019 recopilados por DataMÉXICO (2021), la industria maderera registró un ingreso total de \$42,855M MXN siendo Durango y Nuevo León las entidades con mayor aportación. Mientras que, en el tercer trimestre de 2021, se registró un Producto Interno Bruto (PIB) de \$4.74B MXN concentrándose ahora la mayor cantidad de unidades económicas en Michoacán de Ocampo, Estado de México y Puebla.

En cuanto al estado de Oaxaca respecta, este es acreedor al 3er lugar en producción maderable a nivel nacional con una producción de 624 mil 937 m³ con respecto a datos de la Comisión Nacional Forestal (2019). Es de esta forma que entre los años 2013 y 2014 que son los años en los que se tiene un último registro, el valor de la industria de madera fue de 1,362 millones de pesos para nuestro estado, conforme Anta (2016).

En la actualidad una de las operaciones más solicitadas si no es que la más utilizada dentro la industria maderera, es el secado, la cual permite la separación de humedad de los sólidos por evaporación en una corriente gaseosa, ya sea por contacto directo a una fuente de calor o bien por un método discontinuo conforma según lo establecido por Ocon & Tojo (1980). Dicha operación ha ganado su posición dentro de la industria dado al gran aporte que realiza, puesto que el correcto secado de madera permite una mejora en la estabilidad dimensional y performance de esta, aumento en cuanto a la resistencia física, mecánica y biológica; mejoramiento en condiciones de manipulación y acabado de subproductos, así como la disminución de defectos tales como despegues o arqueamientos con base a lo mencionado por el Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (2009).

Así como el secado proporciona muchas ventajas si se lleva a cabo de forma correcta, esta misma operación puede traer consigo diversas problemáticas si se realiza incorrectamente, tales como pérdida de materia prima por agrietamiento, endurecimiento, colapso celular, rajaduras y torceduras causados por la contracción de la madera generada a su vez por secados severos, gran diferencia psicrométrica o aplicación de gradientes muy altos de calor en maderas delgadas; BOLFORD & Viscarra (1998) mencionan que también existen alteraciones en la coloración deseada debido a manchas resultantes de reacciones químicas dadas durante la operación o bien por invasión de hongos que afectan a la madera antes del secado o durante este si es que no se controla correctamente la temperatura y humedad, es así como todos estos inconvenientes desembocan en costos extras considerados innecesarios e indeseables para el inversionista. De esta forma se sabe que el secado de madera tendrá requerimientos específicos dependiendo del tipo de secado que se quiera llevar a cabo, dentro de los métodos más utilizados que engloban el secado al aire libre, secado solar, secado por deshumidificación y el secado con

uso de aire caliente se tienen como principales desventajas el poco control que se tiene de las variables como la temperatura, el largo tiempo que requiere, la afectación por algunos tipos de hongo o en su defecto el gran consumo energético como nos plantea Hernández (2011).

Es de esta forma que, si se logra la correcta determinación de parámetros como lo son las isothermas de desorción y manteniendo o mejorando la tendencia de producción que se tiene, se podría otorgar un mayor valor agregado a la madera producida a través del secado, para mejorar así su rendimiento y características como el acabado y lograr así su uso en construcción, elaboración de muebles, barcos, etc. Tal como se lleva a cabo con maderas consideradas como preciosas. Posicionando a su vez al estado en un mejor lugar en lo que respecta la aportación económica por medio de la industria maderera.

Por ello el presente trabajo, busca la determinación de propiedades de transporte de masa en madera de encino en el estado de Oaxaca, dado que no existen antecedentes registrados en relación al tema, de esta forma se espera que sea parteaguas para futuras investigaciones e incluso para la optimización en el proceso de secado con respecto a parámetros más específicos, permitiendo así una disminución de la demanda energética requerida, así como en la inversión económica e impacto ambiental que esta conlleva.

1.2 Antecedentes

En la actualidad se tiene conocimiento de la realización de diversos estudios relacionados directamente e indirectamente con la determinación de isothermas de desorción en madera, siendo la gran mayoría de estos realizados de forma experimental a través de diversos métodos siendo los más destacados el método de cámara higrotérmica y el método por sales saturadas. De igual

forma es necesario mencionar que dichos estudios se realizaron en diversos tipos de madera siendo más notable la madera de pino en sus diversas especies.

Un primer trabajo corresponde a Matiauda (1999), quien llevó cabo el “Modelo de secado de madera de pino *Eliotti* a temperaturas moderadas” en dicho trabajo se abordaron temas relacionados al sector forestal tanto nacional como regional, secado de madera y los diversos métodos de secado, usando estas como motivación para proponer un modelo para estudiar, simular y predecir el comportamiento de la transferencia de calor y masa existente durante el secado de madera aserrada de pino *Eliotti*. En dicho trabajo se buscó complementar el modelo, describiendo propiedades y parámetros como lo son el coeficiente de difusión de masa con respecto al contenido de humedad y de la temperatura.

Es así como la muestra a trabajar fue de dicha especie de pino con un espesor de 50 mm y el secado se trabajó a temperaturas moderadas, es decir, por debajo de 100 °C. de esta manera se obtuvieron isothermas de desorción para el intervalo higroscópico de las muestras entre 25 °C y 90 °C, los valores experimentales se ajustaron a diversos modelos obteniendo un mayor ajuste por medio del Modelo de GAB, con un error promedio porcentual de 5.3%

En estudios más próximos al que se realizará en nuestra investigación se tiene el trabajo de L. García et al. (2004) quienes presentaron en su trabajo “Histéresis de la madera de *Pinus sylvestris* L. para isothermas de 35 °C mediante el método de sales saturadas” la cuantificación de la histéresis de la madera de *Pinus sylvestris* L. por medio de la construcción de isothermas de desorción y sorción a 35 °C mediante el método de sales saturadas, las cuales al saturarse en agua proveen humedades relativas estables y conocidas.

De esta manera es que la madera se sometió a las humedades relativas de dichas sales (Cloruro de Litio, Acetato de Potasio, Cloruro de Magnesio, Carbonato de Potasio, Nitrato de

Magnesio, Cloruro de Estroncio, Cloruro de Sodio, Cloruro de Potasio, Cloruro de Bario) hasta alcanzar el equilibrio higroscópico en el proceso de desorción y sorción. Dicha investigación presentó como resultado, isothermas sigmoides ajustadas mediante el Método de Guggenheim y que presentan una transición del 5.70% de humedad para la isoterma de desorción y un 4.83% para la isoterma de sorción.

Por su parte Montoya (2007) en su artículo “Determinación de las curvas isothermas de sorción y el PSF – Punto de Saturación de Fibra – de la especie de bambú *Phyllostachys pubescens* Mazel” el cual fue realizado mediante el estudio de tres tratamientos: natural, natural laqueado y carbonizado, estos tratamientos se realizaron en las siguientes condiciones de humedad relativa y temperatura constante (31% / 20 °C), (66% / 20°C), (86% / 20 °C) y (100% / 20 °C) y en condiciones de humedad relativa externa de 65%.

De estas pruebas se obtuvieron como resultado isothermas de sorción de Tipo II, lo cual indica que la zona b) de adsorción es de baja presión de vapor de equilibrio, mientras que la zona c) los valores son por condensación capilar.

En 2013 durante el Sexto Congreso Forestal español en la ponencia “Estudio comparativo del método de cámara y de sales saturadas en la obtención de los puntos de humedad de equilibrio higroscópico de la limba (*Terminalia superba* Engl. & Diels.)” se ahondó en la comparación entre ambos métodos considerando como punto de partida los datos de la isoterma a 20 °C para el método de la cámara higrotérmica, mientras que para el método de sales saturadas los datos obtenidos de forma experimental son los de las siguientes temperaturas: 15, 35 y 50 °C interpolando posteriormente para la isoterma de 20 °C a través del Modelo de sorción de Henderson.

Es así como con base en el artículo de F. García et al. (2013) se concluyó con una mínima diferencia entre ambos métodos para la obtención de curvas de sorción, considerándolos equivalentes en cuanto a esta especie respecta.

En el estudio “Determinación de la higroscopicidad y comportamiento termodinámico de la madera juvenil a través de sus isothermas de sorción” Simón (2015) abarca desde las características celulares de la madera hasta la sorción en la misma, por lo cual engloba los estados del agua en la misma, regiones y teorías de sorción y sus correspondientes modelos. De esta forma es que dicha investigación que se realizó con maderas tanto juvenil como maduras de: *Abies pinsapo* Boissier., *Abies alba* Mill., *Pinus canariensis* C. Sm. Ex DC., *Pinus nigra* Arnold, *Pinus uncinata* Mill. Ex Mirb. Y *Pinus pinea* L, obtuvo como resultado isothermas de sorción descritas como curvas sigmoideas de Tipo II mismas que presentaron un mayor ajuste al modelo GAB.

1.3 Justificación

Quercus ilex es un subgénero del género *Quercus* englobada en la familia de las fagáceas, este subgénero de árbol se constituye por encinos y se distribuye por regiones templadas y algunas tropicales y subtropicales de México. Las zonas del país más ricas en esta especie son el centro y Sur, destacando así a Oaxaca, Nuevo León, Chihuahua y Veracruz como nos refiere Valencia (2004).

En la actualidad García (2012) nos menciona que su importancia radica en su gran abundancia y utilidad como especie forestal. Ya que el encino es fuente importante de carbón, leña, madera, productos medicinales, corcho y colorantes. Por dicha razón es que se tiene como meta el precisar y ampliar en las propiedades de transporte de masa de la madera obtenida de

mismo dentro del estado de Oaxaca, para generar así un panorama más nítido en cuanto a un mayor aprovechamiento de las mismas, en diversos procesos.

Como menciona Sandoval (2016) el secado de madera es una etapa primordial dentro de diversos procesos para la obtención de productos derivados de la misma, dentro de este se llevan a cabo algunos fenómenos en cuanto al contenido de humedad y temperatura dentro de la materia prima. Esto conllevará la obtención de cinéticas de desorción, seguido así por la determinación de las isothermas de desorción, las cuales se espera, proporcionen herramientas que sean útiles en el desarrollo de modelos matemáticos para la predicción de transferencia de masa; ya que estas traen consigo información correspondiente a la energía necesaria para llevar a cabo la eliminación de agua de un material, además de ofrecer información necesaria para la eficiencia de dicho proceso según lo descrito por Natarén (2015) en su informe final de tesis.

Al llevar a cabo el desarrollo de lo anterior mencionado, se procederá a realizar el análisis de datos por reducción de suma de errores cuadráticos correspondiente, el cual nos brindará parámetros que posteriormente se interpreten de forma rigurosa para determinar los efectos de estos en la calidad de la madera como materia prima.

1.4 Delimitación del estudio

En el trabajo presentado en brevedad se determinan, analizan e interpretan las propiedades de transporte de masa en madera de encino en el estado de Oaxaca a través de la obtención de cinéticas de desorción y sus correspondientes isothermas, esto por el método gravimétrico.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar las propiedades de transporte de masa en madera de encino en el estado de Oaxaca

1.5.2 Objetivos específicos

- a) Obtención de cinéticas de desorción de madera de encino en el estado de Oaxaca
- b) Determinar las isotermas de desorción para madera de encino en el estado de Oaxaca
- c) Análisis de datos y obtención de parámetros utilizando la reducción de suma de errores cuadráticos
- d) Interpretar los parámetros obtenidos

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Madera de encino

Este tipo de madera proviene del género *Quercus* el cual a su vez pertenece a la familia Fagaceae y de con base en lo que menciona Trelease (1924) este mismo se divide en seis subgéneros y de los cuales, tres vegetan México: *Leucobalanus* (encinos blancos), *Erythrobalanus* (encinos rojos) y *Protobalanus* (encinos negros).

En cuanto al estado de Oaxaca según SEMARNAT (2018) es uno de los estados que presenta mayor número de especies y conforme a lo mostrado en la *Tabla 1* se tiene aproximadamente una producción maderable de 33,946 m³ con un valor aproximado de \$14,177,346 MXM.

Tabla 1 Destino de Producción Forestal Maderable Por Estado y Grupo de Productos de Encino

Estado	Escuadría	Celulósicos	Chapa y triplay	Postes, pilotes y morillos	Leña	Carbón	Durmientes	Total
Oaxaca	1,361	0	0	0	32,584	0	0	33,946

Fuente: SEMARNAT (2018)

2.1.1 *Quercus laurina* Humb. & Bonpl.

El *Quercus laurina* Humb & Bonpl. pertenece al subgénero de *Erythrobalanus* es decir a los encinos rojos y comúnmente es conocido solo como chilillo, encino roble, encino laurelillo, encino colorado, encino blanco, encino iricua, encino hoja angosta, xicatahua, tesmolera, atualpitzahual y huitzalacate conforme a lo mencionado por De la Paz Pérez Olvera et al. (2016)

En el estado de Oaxaca esta especie se localiza principalmente en el municipio de San Pedro Yolox (*Figura 1*) perteneciente al distrito de Ixtlán de Juárez ubicado en la región de la

Sierra Norte en las coordenadas 17°35' de latitud norte y 96°33' longitud oeste, a una altitud de 1,940 metros sobre el nivel del mar según datos del H. Ayuntamiento de San Pedro Yoloix (s. f.).



Figura 1 Municipio de San Pedro Yoloix, Oaxaca

Fuente: Battroid (2009)

Algunas de las características de dicha especie de madera han sido estudiadas a través de diversos estudios, en la *Tabla 2* se presentan algunos de los datos obtenidos del estudio realizado a ejemplares de *Quercus laurina* del municipio ya antes mencionado.

Tabla 2 Características de *Quercus laurina* Humb & Bonpl.

Color	Olor y sabor	Brillo	Veteado	Textura	Hilo	Radios multiseriados		Visibilidad de elementos
						No. En 5 mm	Altura [cm]	
Rosa	No	Media no	Pronunciado	Gruesa	Recto	Pocos	Altos	Todos a simple vista
Radios rojo	distinguibles					Min. 2	Min. 0.2	
pálido						Máx. 3	Máx. 1.9	
						Med. 2	Med. 0.7	
VASOS								
POROS			ELEMENTOS DE VASO					

Porosidad	Agrupación / Arreglo	No. Por mm	Diámetro tangencial [μm]	Puntuaciones	Longitud [μm]	Placa perforada	Campos de cruce	Traqueidas vasicéntricas
Semi anular		Pocos						
	Solitarios / en hileras	Min. 3	Mediano		Mediana		Simple	
	radiales	Máx. 5	Min. 40	Areoladas	Min. 317	Simple	de bordes	Presentes en
	largas	Med. 4	Máx. 204	alternas	Máx. 562		reducidos y arreglo vertical	madera temprana
			Med. 122		Med. 438			

Fuente: de la Paz Pérez Olvera et al. (2016)

2.2 Estructura de la madera

La madera es considerada una de las materias primas de mayor relevancia en la actualidad junto con el carbón y petróleo, por ello conocer sus características nos permite una mayor eficiencia en cuanto a su uso o manejo dado que nos dan una guía en cuanto a las propiedades que posee, resistencia y susceptibilidad a ser dañada por agentes externos. Esta se puede definir como un material biológico, renovable, orgánico, poroso, higroscópico, anisotrópico y heterogéneo según el concepto manejado por la Comisión Nacional Forestal (2011).

2.2.1 Estructura microscópica

Con base a lo mencionado por el Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (2009) nos podemos referir a la madera como un material orgánico que se encuentra constituida por carbono (aprox. 50%), oxígeno (aprox. 44%) e hidrógeno (aprox. 6%) y trazas de compuestos inorgánicos varios. Es como de esta manera dicho material está compuesto por diversos tipos de células las cuales en su gran mayoría son alargadas y ahusadas pero huecas es así como obtiene

su porosidad. Aunque también se ha de considerar la especie de cada madera dado que las características de la misma varían conforme su especie y origen.

Según Rowell (2021) el componente químico principal es el agua, pero el peso seco de la pared celular se conforma en polímeros a base de carbohidratos tales como la lignina, celulosa y hemicelulosa en porcentajes de 20 – 30%, 40 – 50% y 25 – 35% respectivamente, el porcentaje restante se consideran como impurezas orgánicas.

Por su parte Arostegui (1982) nos deja entre ver que las funciones principales de dicho tipo de estructura son la conducción de agua, almacenamiento de sustancias de reserva y resistencia mecánica dichas funciones son llevadas a cabo por tres tipos de tejidos; vascular, parenquimático y fibroso respectivamente, es como de esta manera se asume que la característica microscópica fundamental es la parte maderable ya antes abordada desde su composición química.

2.2.2 Estructura macroscópica

En cuanto a la estructura macroscópica de la madera Giménez et al. (2005) nos mencionan tres planos o secciones para su correcto estudio: transversal (perpendicular al eje de la rama o tronco), radial (pasa por el eje y un radio de la rama o tronco) y tangencial (paralela a un plano tangente al tronco o anillo de crecimiento). Teniendo esto como resultado una estructura macroscópica (*Figura 2*) conformada por:

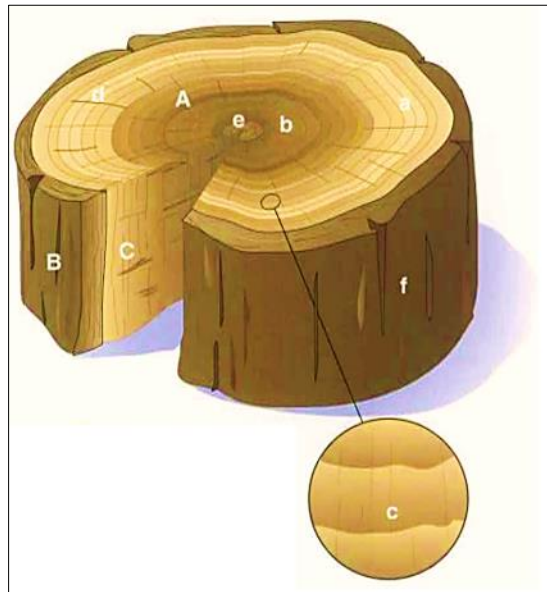


Figura 2 Estructura macroscópica de madera

Fuente: Giménez et al. (2005)

Nota: A: Sección transversal, B: sección tangencial, C: Sección radial, a: Albura, b: Duramen, c: Anillos de crecimiento, d: Radios leñosos, e: Médula, f: Corteza.

- a) *Medula*: de sección circular, poligonal o estrellada. Esta tiene poca importancia por su dimensión pequeña y usualmente es desechada en los procesos de producción de madera dadas sus deficientes características físicas y mecánicas.
- b) *Radios leñosos*: de importancia en cuanto a la identificación de madera y en propiedades de contracción de la misma. En cuanto mayor desarrollo y abundancia de radios leñosos se presente la madera poseerá una resistencia a la raja en el sentido radial inferior a la presentada en el sentido tangencial.
- c) *Anillos anuales o estacionales*: utilizados en la apreciación de clase y calidad de la madera. Estos anillos varían en cuanto a la clasificación de la madera (coníferas y

frondosas) ya que al tipo conífera no se atribuye ninguna tipología estacional dada la ausencia de vasos; mientras que en el tipo frondosa se relacionan en cuanto a sus tipos de poro (porosos, difuso y semiporoso). Dichos anillos también dependerán de si se trata de madera de verano o madera de primavera.

- d) *Duramen y albura*: el duramen es el nombre que recibe la parte más seca y de color más oscuro del tronco y ramas, mientras que la albura es la madera ubicada en la parte más externa del tronco, esta es encargada de transportar la savia bruta

2.3 Interacción agua – madera

La madera es considerada un material higroscópico con capacidad de intercambiar agua en respuesta al ambiente que le rodea (temperatura y humedad relativa). Y aunque esta propiedad se puede considerar como una desventaja en cuanto a fines comerciales, el estudio de la interacción agua – madera es de relevancia tanto en el ámbito industrial como en el científico como nos permite entender Skaar (1988) en su libro.

Este mismo autor nos permite comprender que la higroscopicidad de la madera radica en su propia composición química dado que la celulosa y hemicelulosa, dos de los componentes principales de la pared celular, en presencia de grupos -OH pertenecientes a los enlaces carboxilo $H - C - OH$ Y $H - C - CH_2 - OH$ producen uniones moleculares a través de puentes de hidrogeno debido también al carácter polar del agua y la madera. En el estudio de L. García et al. (2004) se nos menciona que es de esta manera que la madera tiende a un equilibrio dinámico con el aire de su entorno alcanzando así un contenido de humedad referido a su peso seco que es conocido como punto de equilibrio higroscópico.

2.3.1 *Actividad de agua*

Avramidis (1992) expuso tres tipos de agua en cuanto a interacción: agua de constitución (parte de la composición química), agua ligada y agua libre, aunque algunos autores tales como (Telkki et al., 2013; Thygesen et al., 2010) discrepan y solo dan lugar a los dos últimos mencionados definiéndolos de esta manera como:

- a) *Agua ligada o Bound water*: agua retenida en las paredes celulares por interacción que afecta las propiedades físicas y mecánicas de la madera conforme a lo mencionado en el estudio de Wang et al. (2012).
- b) *Agua libre o Free water*: se encuentra en los capilares o lúmenes de las células, sin existencia de unión entre moléculas y sitios de sorción. Esta a su vez se puede subdividir según lo mencionado por (Berthold et al., 1996; Ping et al., 2001) en *freezing bound water* la cual corresponde al agua que se une de forma indirecta a través de enlaces débiles y se congela entre -10 y -20 °C según ... y *non – freezing bound water* la cual está ligada fuertemente a la madera interactuando así directamente con los grupos hidroxilo de esta forma se estima una congelación por debajo de los -70 °C por lo expuesto en el artículo de Engelund et al. (2012).

2.3.2 *Contenido de humedad*

El contenido de humedad (CH) también conocido como grado de humedad o humedad de madera ha sido definido por (Acuerdo de Cartagena. Junta et al., 1989; Córdoba, 2005) como el peso de la cantidad de agua presente en la madera, es decir, es la relación entre el peso del agua contenida en la madera respecto al peso seco (libre de humedad) de la misma. Es así como este

valor de este se da en valores porcentuales y se calcula por medio de las *Ecuaciones 1 y 2* considerando en este caso un cálculo de humedad base seca.

$$CH = \frac{\text{Peso del agua}}{\text{Peso madera seca}} \times 100 \quad (1)$$

$$CH = \frac{Ph - Ps}{Ps} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

CH = Humedad de la madera expresada como un porcentaje de su peso anhidro [%]

Ph = Peso de la madera en estado húmedo o peso inicial [g]

Ps = Peso de la madera en estado anhidro o peso final o constante [g]

El conocer el contenido de humedad de la madera es de vital importancia para las aplicaciones de la misma y los procesos a aplicar.

Humedad de equilibrio.

A lo largo del tiempo diversos autores como (Baraúna & Oliveira, 2009; Skaar, 1988) han definido el contenido de humedad de equilibrio (CHE) como el estado en el que la humedad de la madera logra tener un equilibrio con las condiciones ambientales que le rodean. Este equilibrio puede ser afectado por cambios en la humedad relativa (HR) y temperatura (T) del aire circundante, es por ello que se considera que ninguna madera se encuentra verdaderamente en equilibrio, al menos no de forma permanente, ya que las condiciones ambientales varían

constantemente; este fenómeno es conocido como inercia higroscópica conforme lo mencionado por Álvarez Noves y Fernández (1996).

2.3.3 *Determinación de humedad en madera*

En la actualidad se tiene conocimiento de diversos métodos que se utilizan para la determinación de humedad, cada uno de ellos ofrece ventajas y desventajas particulares que se han de considerar al momento de su selección ya que esta se deberá hacer con respecto a lo que se esté buscando obtener de forma específica, así como los materiales y medios con los que se cuente.

Entre los métodos más utilizados se encuentra el método gravimétrico también conocido como método de secado en la estufa, para algunos autores es considerado como el más exacto y científicamente satisfactorio para la determinación de humedad tal es el caso de Saavaedra (2014), sin embargo, para Skaar (1988) presenta desventajas cuando se requiere obtener contenidos de humedad precisos. En este proceso, se toman muestras de madera y se pesan para obtener el peso húmedo o peso inicial, posteriormente las mismas se colocan y secan en un horno o estufa a condiciones constantes realizando pesajes ya sea consecutivos o esporádicos, esto hasta obtener un peso constante o final. Otro método utilizado en dicha determinación es el de destilación esto debido a que algunos investigadores como Skaar (1988) lo consideran como una modificación del método gravimétrico diseñada para disminuir los errores sustanciales originados por la evaporación de componentes volátiles distintos del agua durante el secado. Dicho método consiste en el calentamiento de la madera en un equipo de destilación que contiene un líquido inmiscible en agua que es considerado un disolvente para los compuestos extractivos volátiles. Es de esta manera que el agua se condensa en un sistema condensador de

reflujo y se separa del disolvente por medio de una trampa calibrada, por lo planteado por Gutiérrez (2016) este procedimiento se efectúa generalmente en maderas con alto contenido de resinas, terpenos y otras sustancias de impregnación.

El Método de valoración de Karl Fischer, aunque es menos utilizado que los dos anteriores es también de gran aporte ya que conforme a lo que exponen Rivera y Pérez (2006) esta es una técnica analítica en la cual el contenido de humedad se mide por medio de una valoración comúnmente conocida como titulación utilizando el reactivo de Fischer.

Algunas otras técnicas en la determinación de humedad menos utilizadas o raramente utilizados son la Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y los Métodos eléctricos; el primero está basado en el hecho que el núcleo de cada átomo de hidrógeno en el agua es un dipolo magnético debido a su espín característico. Mientras que el segundo se compone de diversos medidores de humedad que se dividen en dos tipos conforme a lo encontrado en el libro Wood - Water Relations de Skaar (1988).

- a) *Medidor de resistencia*: es el más antiguo y de funcionamiento más simple, este mide la resistencia eléctrica de CC (baja frecuencia).
- b) *Medidor de humedad dieléctrico*: este mide alguna función de la constante dieléctrica compleja o la permitividad eléctrica de la madera. Utiliza técnicas de CA (corriente alterna) en frecuencias que van desde el audio hasta el rango de microondas.

2.3.4 Determinación de humedad relativa

La medida de la humedad relativa (HR) o actividad a de la atmósfera se basa en técnicas desarrolladas por meteorólogos. Ya que la importancia de conocer la humedad relativa de

equilibrio ERH o actividad de la madera radica en que cuando la madera está en equilibrio, su ERH es igual a la del entorno. Por lo tanto, su contenido de humedad de equilibrio CHE se puede estimar a partir de su isoterma de sorción a temperatura ambiente si la humedad relativa es conocida.

Algunas de los métodos o equipos que se utilizan para su determinación se abordan a continuación conforme a lo que destacan (Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera – CITEMadera & Ugarte, 2017; Skaar, 1988; Wexler & United States. National Bureau of Standards, 1965)

- a) *Higrómetros*: instrumentos cuyas propiedades físicas o químicas cambian en función de la humedad relativa ambiental, estos miden el grado de enfriamiento por evaporación de un termómetro colocado en una mecha saturada de agua, una función inversa de la humedad relativa.
- b) *Sensores de punto de rocío*: estos miden la temperatura a la cual o por debajo de la cual se produce la condensación del vapor, también una función inversa de la humedad relativa.
- c) *Psicrométrico*: mide la humedad relativa por medio de la diferencia psicrométrica que existe entre la temperatura del aire que mide un termómetro (bulbo seco) y la temperatura que mide un termómetro recubierto con un tejido con capacidad de absorción llamado bulbo húmedo. Esta la diferencia es conocida como depresión del bulbo húmedo y está relacionada a la humedad relativa del aire que indica su nivel de saturación. El valor de la HR se determina a través de una tabla psicrométrica o por

medio del gráfico de Keylwerth, cabe mencionar que ambos indican también el contenido de Humedad de Equilibrio (CHE).

d) *Sondas de Humedad en Madera*

2.4 Introducción a secado

Ángeles (2012) define el secado como la operación unitaria que se caracteriza por la separación o eliminación total o parcial de la humedad contenida por un sólido, esto a través de la vaporización de la misma ya sea en el seno de una corriente gaseosa o no. Es de esta manera como dentro de dicha operación se llevan a cabo dos procesos fundamentales de forma simultánea la transmisión de calor y la transferencia de masa en conjunto con varios tipos de procesos tales como transformaciones físicas o químicas según lo abordado por Mujumdar (2008) en su libro.

2.4.1 Secado de madera

Durante el proceso de secado el Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (2009) menciona algunas de las propiedades de la madera que influyen en este directamente, estas son: higroscopicidad que se define como la capacidad de la madera de intercambiar (absorber o ceder) agua con el medio que la rodea, anisotropía que hace referencia al comportamiento de la madera en sus tres ejes (longitudinal, radial y tangencial) con respecto a la alteración dimensional. Y la densidad ya que esta propiedad en específico varía con respecto a la cantidad de humedad que posee la madera y permite a su vez determinar la especie a la que pertenece por medio de la constitución anatómica.

Como anteriormente se mencionó, al realizarse el secado de madera se espera mantener una buena estabilidad dimensional, una disminución en presencia de defectos (arqueamientos, abertura de uniones, rajaduras, etc.), un aumento en cuanto a resistencia mecánica, física y biológica, así como una mejora en las condiciones de trabajabilidad y acabado. Sin embargo, si el proceso no se lleva a cabo correctamente el mismo puede tener efectos indeseables tales como: colapso, agrietamiento, torceduras y manchas químicas conforme lo abordado por BOLFOR & Viscarra (1998) en su guía para el secado de madera en hornos.

Algunos factores que influyen para obtener un secado considerado de buena calidad citados por el Centro de Innovación Tecnológico de la Madera (2009) son: especie de madera, espesor, contenido de humedad inicial, higroscopicidad y la zona de origen de la madera. A sí mismo en este libro se definen como variables indispensables en el proceso de secado a la temperatura la cual afecta la aceleración de evaporación, la humedad relativa del aire ya que la cantidad de vapor determina el movimiento de la humedad es decir a menor contenido de humedad en el aire mayor velocidad de secado, el gradiente de secado el cual es la relación entre el contenido de humedad real de la madera (CH real) y el contenido de humedad de equilibrio (CHE); y la velocidad del aire que se encarga de transmitir la energía requerida para la evaporación del agua y transportar el vapor de agua saliente de la madera.

2.4.2 *Tecnologías tradicionales*

En cuanto al secado de madera respecta desde tiempo atrás se suelen utilizar tecnologías o técnicas que en la actualidad se han llegado a considerar como tradicionales dado que comprenden una parte fundamental en la industria de la madera, así como una base para las nuevas tecnologías y/o técnicas.

Uso de aire caliente (convencional).

Para lo que respecta a Shusheng et al. (1995) en el proceso de secado de madera por medio de aire caliente, se debe trabajar con temperatura media. En este proceso se cuenta con una caldera de madera o carbón que calienta el agua de 0 °C a 100 °C la cual pasará a través de unos intercambiadores de calor también conocidos como radiadores (serpentes) que se encuentran instalados dentro del horno junto con ventiladores de gran capacidad que generan una corriente de aire caliente, dicho tipo de horno se puede apreciar en la *Figura 3*.



Figura 3 Horno para secado de madera

Fuente: Del Valle (2022)

En algunas ocasiones dichos hornos se equipan con boquillas de aspersión de agua las cuales son utilizadas cuando se tiene la necesidad de humectar o aumentar la humedad relativa dentro de la cámara, también suelen tener ventilas o chimeneas en los extremos las cuales se abren o cierran para el control de humedad y temperatura a su vez estas dejan salir el aire húmedo e introduce aire nuevo, cabe destacar lo mencionado por Terziev (1995) en su artículo, ya que algunas cámaras la humectación se lleva a cabo con vapor de agua el cual cumple dos funciones: calentar y humedecer el ambiente dentro de la misma.

Secado al aire libre (natural).

El secado natural se considera como el proceso de secado de madera más antiguo al igual que uno de los más utilizados dado a que se aplica en diversas situaciones y en diferentes zonas geográficas. Wallace et al. (2003) establecen que este proceso consiste en colocar la madera al aire libre dejando transcurrir el tiempo hasta que alcance el equilibrio higroscópico del aire que se encuentra en su entorno. Este método se representa a continuación en la *Figura 4*.



Figura 4 Secado de madera al aire libre

Fuente: Guatibonza (2010)

Sin embargo, el mismo tiene como principal desventaja el tiempo mismo que requiere ya que el proceso depende netamente de variables no controlables como la luz solar, velocidad del viento y la exposición a puntos cardinales según lo indicado por Vignote y Martínez (2006). Mientras que en el informe de Hernández (2001) se destaca la poca homogeneidad en los resultados obtenidos, dado que no toda la madera seca de igual manera así que no se puede

definir con exactitud la humedad final, a su vez la madera al estar expuesta a ciertas condiciones ambientales se puede ver atacada por hongos.

Secado por deshumidificación.

El principio de este está basado en la creación de una atmosfera seca que rodee la madera, dado a que la temperatura no es elevada (50 °C) la cámara no requiere de protección contra pérdidas de calor. De igual manera dentro de esta hay ventiladores y deshumidificadores también conocidos como bombas de calor. La humedad dentro de la cámara se elimina por condensación sobre los serpentines fríos de la bomba de calor. Mientras que el aire deshumidificado pasa por medio de los serpentines para transmitir la energía a la madera, conforme a lo mencionado por Vignote y Martínez (2006), en seguida se presenta un ejemplo de la cámara ya antes mencionada (*Figura 5*).

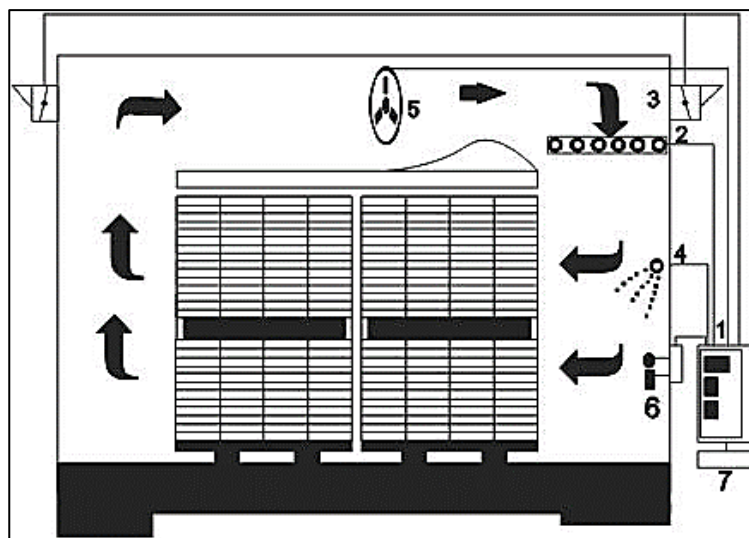


Figura 5 Cámara de deshumidificación para secado de madera

Fuente: Barreiro & Hirsch (2011)

Esta variedad de secado es considerado lento dado que requiere varias semanas o meses para completar el proceso, aunque en la actualidad se han añadido resistencias para elevar la temperatura y aumentar a si la velocidad. La ventaja de este tipo de secado es el bajo consumo energético y por ende monetario, así como el bajo riesgo de deterioro.

Secado solar.

Este se basa en el correcto aprovechamiento de la energía solar para la remoción de humedad. Se cuenta con diversos tipos de secadores solares los cuales se ajustan a los requerimientos del usuario, algunos de los tipos de secadores son mencionados en el informe de nuevas tecnologías solares de Murthy (2009), siendo estos: secadores de convección natural, forzada de tipo indirecto y tipo invernadero.

Los principales componentes de un secador son: la cabina de sacado, colector de energía solar y ventilador eléctrico para circulación de aire. Con base a lo expuesto por Farkas et al. (1999) el funcionamiento de la cabina de secado consiste en la extracción de aire caliente que se tiene en el colector con ayuda de los ventiladores, este mismo se introduce a la cámara de secado para posteriormente dirigirse a la madera colocada en la estufa y así pasar a través de esta. En la *Figura 6* se muestra el proceso de secado solar.

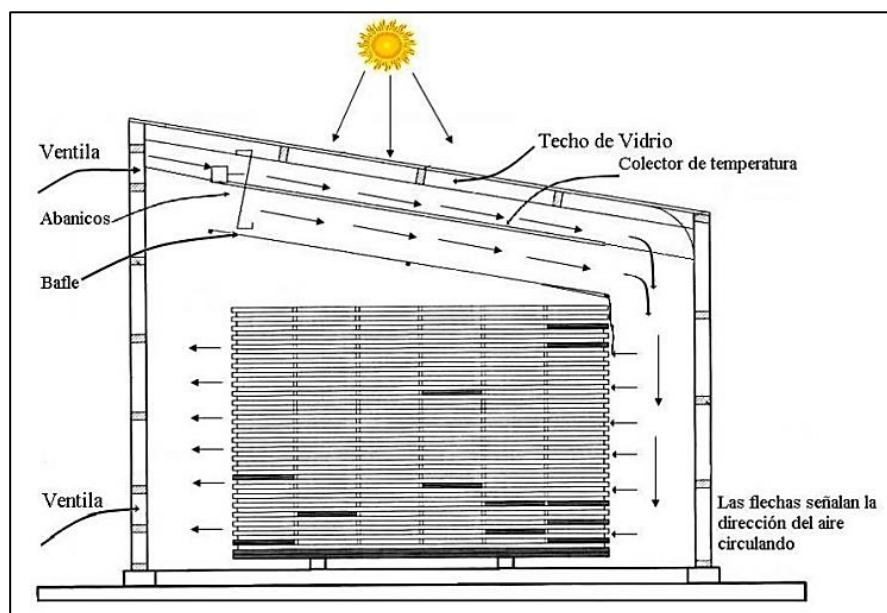


Figura 6 Secado solar

Fuente: Salas et al. (2008)

Entre las desventajas que tiene este tipo de secado Víglasky et al. (2006) destacan el tiempo requerido y como este depende meramente de las condiciones climáticas.

2.4.3 Tecnologías emergentes

Secado en vacío.

Este se diferencia de los secados convencionales ya que requiere una cámara a baja presión que basado en la termodinámica, reduce el punto de ebullición del agua facilitando así la transferencia de humedad (*Figura 7*). Este método es aplicado usualmente para el secado de maderas duras ya que ayuda a la prevención de colapsos y decoloración por lo mencionado en el artículo de Perré y Turner (2006).



Figura 7 Secador de vacío

Fuente: Adelizzi (2021)

La principal desventaja que muestra dicho método es el alto costo de las cámaras, sin embargo, dicha desventaja se ve compensada por la reducción de tiempos de producción el cual es de aproximadamente 10 horas, así como el ahorro energético y la alta calidad obtenida en comparación con otros sistemas de secado conforme a Perré y Turner (2006), es así como este tipo de secado está orientado a maderas de alto valor agregado.

Secado por microondas (radiofrecuencias).

Este tipo de secado está enfocado a cargas pequeñas y se diferencia notoriamente de todos los métodos anteriores dado al principio de radio frecuencia. Por medio de este método el agua contenida en las células o lúmenes comienzan a vibrar con alta frecuencia generando energía que se encarga de evaporar el agua, en la *Figura 8* se aprecia dicho equipo.



Figura 8 Secador de radiofrecuencia o microondas

Fuente: Lanchas (2018)

Con este tipo de secado se consiguen tiempos de secado genuinamente rápidos, sin embargo, sus principales desventajas son el consumo de energía y el alto costo de los equipos por lo planteado en los artículos publicados por (Perré et al., 2004; Turner & Perré, 2004; Zhao & Turner, 2000).

2.5 Sorción y desorción en madera

Dada la higroscopicidad de la madera en esta se pueden presentar dos fenómenos con respecto a la interacción agua – madera, la desorción que conlleva la pérdida de agua y el proceso de adquisición de la misma, también conocido como sorción. Ambos dependen de diversas variables y factores que pueden alterarlos, Bergthaller (1975) destaca como principal factor la temperatura.

Es decir, si la madera seca (no forzosamente en estado anhidro) se expone a condiciones higrotérmicas con un contenido de humedad de equilibrio superior y comienza a admitir moléculas de agua se está llevando a cabo el proceso de sorción. Mientras que, si la humedad relativa disminuye, la madera comenzará a eliminar moléculas de agua y presentando así el proceso de desorción citando lo mencionado por L. García et al. (2004).

2.5.1 Teorías de sorción

A lo largo del tiempo se han propuesto y aceptado diversas ecuaciones para describir el fenómeno de sorción y sus respectivas isothermas, la mayoría de estas son netamente obtenidos de forma empírica, sin embargo, existen otras más que se fundamentan en cuestiones teóricas o bien que son semiempíricas. Es como de esta forma dichas teorías buscan ofrecer una respuesta a la relación que existe entre las moléculas de agua y la pared celular de la madera.

Skaar.

Skaar (1988) menciona que la disposición de las moléculas de agua en madera se da en diversas capas denominadas como monocapa y multicapa. Es como de esta manera las moléculas de agua se unen a los sitios de la pared celular formando una monocapa sobre la superficie, para que posteriormente nuevas moléculas se enlacen con las ya presentes en la monocapa y así formar múltiples capas a este conjunto de capas se le conoce como multicapa como se muestra en la *Figura 9*.

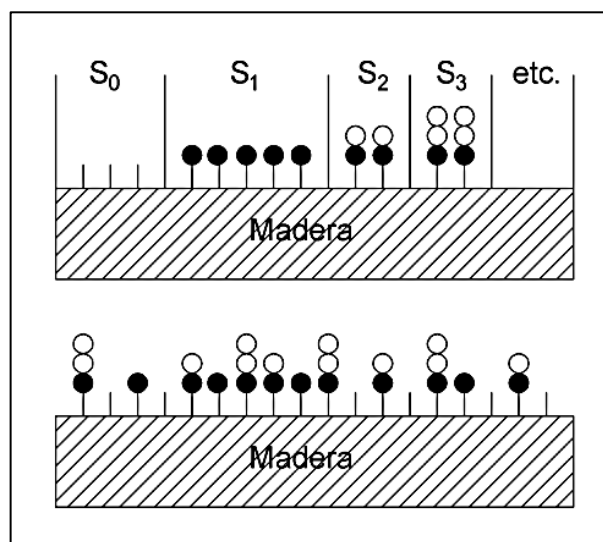


Figura 9 Disposición de moléculas de agua en monocapa y multicapa

Fuente: Hartley et al. (1992)

Citando a (Cortés et al., 2011; Hartley, 1994) los modelos de BET y GAB se basan en esta teoría exponiendo que la atracción es similar en todas las capas que conforman la multicapa y aunque se podría incluir a Polanyi se llega a omitir debido a que este plantea que la atracción entre capas va disminuyendo al aumentar la distancia que existe entre estas y la superficie del sólido.

Hartley.

La teoría de Hartley también es conocida como teoría clusters y tiene como antecedentes las teorías propuestas por Goring (1978) que plantea que las fibras de celulosa perturban la estructura del agua creando una capa unida a los grupos hidroxilos de la superficie celulósica y formándose así los clusters en las zonas más alejadas, esta teoría a su vez se fundamenta en el estudio de la celulosa en el agua. Y la teoría de Caulfield (1978) que se basó en el análisis del

agua en la celulosa y evidenció la creación de enlaces entre fibras y agua sin perturbación alguna.

Es así como (Hartley, 1994; Hartley et al., 1992) propone lo siguiente (*Figura 10*):

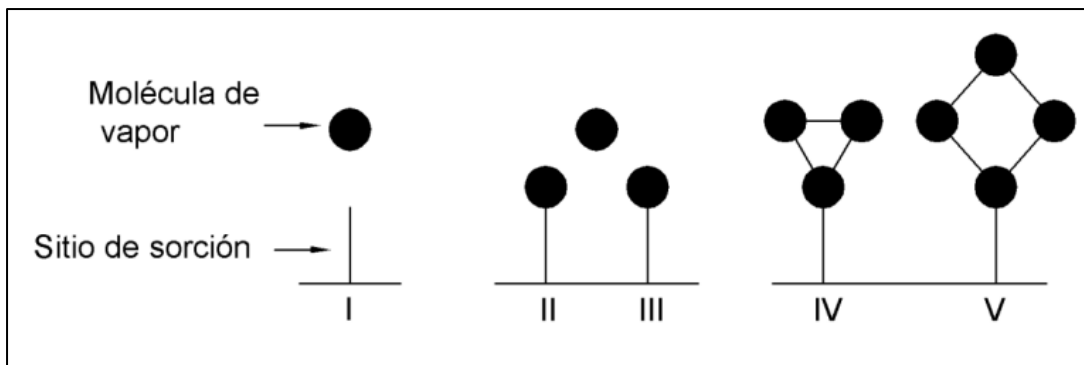


Figura 10 Formación de clusters en el proceso de sorción de madera

Fuente: (Hartley, 1994; Hartley et al., 1992)

- a) Las primeras moléculas de agua adsorbidas por la madera se unen a sitios de sorción (I)
- b) A mayor cantidad de agua la hidratación unimolecular continua, sin embargo, algunas moléculas pueden verse atraídas por sitios ya ocupados. Este fenómeno radica en que los sitios de sorción no presentan energía uniforme y como resultado se forman dímeros (en II y III, en función de la energía) y trímeros (IV) que aumentan la movilidad de las moléculas de agua.
- c) Las sucesivas moléculas que penetraron en la pared celular se unen a los clusters ya existentes aumentando así su tamaño (V).

Engelund.

Dicha teoría está basada en estudios realizados previamente por Berthold et al. (1996) quien estimó un valor de 1.35 moléculas de agua por sitio de sorción cuando se trata de materiales lignocelulósicos y Joly et al. (1996) que demostró a partir de una observación en algodón de celulosa, que una molécula se puede encontrar enlazada a dos sitios de sorción de forma simultánea.

Es de esta manera que Englund et al. (2012) nos plantea que la cantidad de moléculas de agua que se encuentran unidas a un sitio de sorción no es solamente una, sino que pueden unirse dos moléculas por sitio o bien una molécula unida a dos grupos hidroxilo de forma simultánea.

Y aunque en la actualidad se tiene conocimiento de más teorías, se debe considerar que algunas son abordadas posteriormente, otras más poseen una complejidad más elevada en cuanto a su desglose o bien, son base para estudios con un grado de especificación mayor algunas de estas tales como: teoría de Peirce, ecuaciones de Enderby – King, ecuaciones de Bradley, entre otras son abordadas por Skaar (1988).

2.5.2 Isotermas de sorción

Se conoce como isoterma de sorción o adsorción a la representación gráfica de la relación que existe entre el equilibrio de la cantidad adsorbida de agua y la presión a una temperatura constante, esto conforme lo mencionado por Viades (2008). Esta misma también es definida por Fennema (1992) como la representación gráfica de a_w contra el contenido de agua a temperatura constante. Y en otros términos más específicos en cuanto a madera Skaar (1988) nos menciona que es el rango comprendido entre el secado en estufa y el punto de saturación de la fibra, es decir, la correspondencia que existe entre el contenido de humedad de equilibrio y la humedad relativa para una temperatura constante que se representa por una curva sigmoidea.

Estas isothermas se utilizan comúnmente en el estudio del comportamiento higroscópico de la madera y productos derivados de la misma dado a que los datos obtenidos de estas pueden ser utilizados para la correcta selección del punto final del secado (contenido óptimo de humedad residual del producto final) conforme a lo mencionado por (Gal, 1987; L. García et al., 2004). Y en la actualidad se sabe que de forma general dichas isothermas son utilizadas en el diseño y simulación de procesos de secado.

Tipos de isoterma de sorción.

La IUPAC (1972) establece una clasificación de curvas o isothermas de sorción que se puede apreciar en la *Figura 11*, en esta se observa que la clasificación se conforma por seis grupos en función de la porosidad y del sistema absorbente – adsorbato.

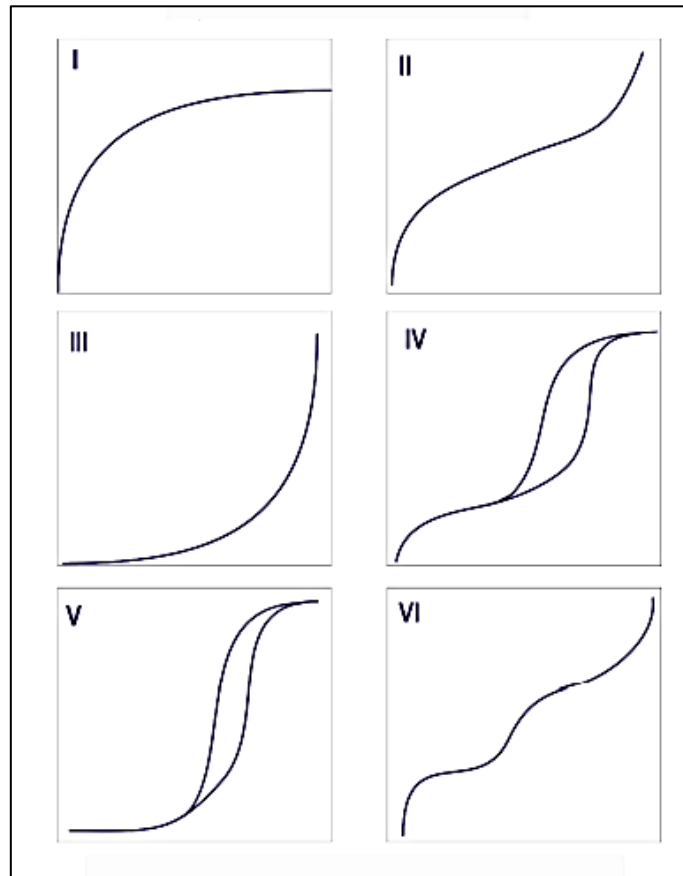


Figura 11 Clasificación de Isotermas de sorción

Fuente: IUPAC (1972)

A continuación, se presenta una breve descripción de cada una con respecto a lo abordado por (Avramidis, 1992; IUPAC, 1972).

- a) *Isoterma Tipo I*: característica por representar procesos de sorción en los cuales se formó una sola capa de vapor con una molécula de espesor. Es decir, la adsorción se presenta a presiones relativamente bajas esto usualmente se presenta en sólidos microporosos.

- b) *Isoterma Tipo II*: por lo general representa procesos en los que se formó más de una capa de vapor y las fuerzas de atracción entre vapor y sólido son mayores. Esta isoterma es resultante de la unión entre la curva de Tipo I y Tipo III. Esta a su vez posee una forma sigmoidea y se presenta usualmente en sólidos macroporosos o no porosos.
- c) *Isoterma Tipo III*: similar a la de Tipo II, sin embargo, se diferencia de esta, dado que las fuerzas presentes entre el vapor y el sólido son más débiles.
- d) *Isotermas Tipo IV y V*: ambas suelen ser el resultado de procesos de sorción en los que la cantidad final de adsorción se ve limitada por la condensación capilar. Cabe mencionar que cada una de estas presenta dos cualidades particulares, en el caso de la Isoterma Tipo IV esta se observa por lo regular en sólidos de tipo mesoporosos, mientras que en la Isoterma Tipo V el tramo final de la curva no presenta un comportamiento asintótico.
- e) *Isoterma Tipo VI*: se le conoce también como tipo escalonado y por lo general es raro que se presente ya que se da en sólidos no porosos de superficie uniforme.

En la actualidad una nueva clasificación propuesta a partir del modelo de sorción presentado por Yanniotis y Blahovec (2009) ha ido ganando campo ya que está dada en función de los parámetros que aborda dicho modelo tal como se muestra en la *Tabla 3*.

Tabla 3 Clasificación de Isotermas de sorción conforme el Modelo de Blahovec y Yanniotis

Tipo		Parámetros			
		D ₁₀	R _{fi}	a _{wm}	X ₄
I: Isotermas Tipo Langmuir		Positivo	Positivo	-	$< X_2 / X_1$
II: Isotermas Sigmoideas	Similar al tipo Langmuir	Positivo	Negativo	(0;1)	Negativo
	Similar al tipo Solución	Positivo	Negativo	(0;1)	Positivo
III: Isotermas Tipo solución		Negativo	Positivo	-	$> X_2 / X_1$

Nota: D₁₀: primera derivada del modelo para a_w = 0; R_{fi} = radio de la primera derivada de a_w / w - a_w para a_w = 1 respecto al valor para a_w = 0; a_{wm}: actividad de agua extrema; X₁, X₂, X₄: constantes del modelo.

Fuente: Yanniotis y Blahovec (2009)

Como se puede observar dicha clasificación se cuentan con tres tipos de isotermas considerando a su vez una subdivisión del segundo tipo.

2.5.3 Regiones de sorción

Los diferentes tipos de isotermas de sorción se pueden dividir en regiones para su mayor comprensión al momento de interpretar datos, en el caso de una curva de sorción que describe el comportamiento de madera, esta suele dividirse en tres regiones (*Figura 12*) conforme a la fuerza de unión que existe en los diferentes rangos de humedad relativa HR.

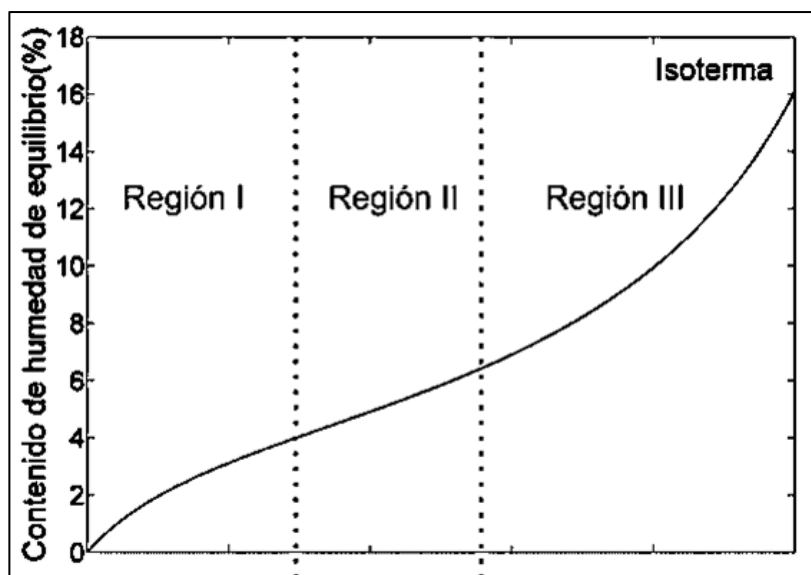


Figura 12 Regiones de Isoterma de sorción

Fuente: Simón (2015)

De acuerdo a lo mencionado por Hartley (1994) en esta división la Región I está caracterizada por la formación de enlaces entre las moléculas de agua y los sitios de sorción es decir que la adsorción se produce principalmente por quimisorción y crea de esta manera una monocapa. Mientras que la Región II se encuentra dominada por la sorción física o bien conocida como fisisorción por ello las uniones que se forman son más débiles que las de la Región I ya que estas son de tipo electrostáticas, aunque cabe mencionar que aún siguen existiendo uniones químicas, de igual manera en esta región es donde se originan cambios pequeños en la curvatura de la isoterma dada la reorganización de las moléculas de agua con el fin de alcanzar un nivel de energía homogéneo en toda la superficie de sorción.

La Región III al igual que la Región II es dominada por el fenómeno de fisisorción, aunque haya otras fuerzas que intervienen, dicha zona tiene como característica el rápido crecimiento de la isoterma debido a la formación de la multicapa y de clusters. Aunque diversos

autores como (Engelund et al., 2013; Yang et al., 2014) mencionan como causas probables la condensación capilar y el efecto softening.

2.5.4 Modelos de sorción

Actualmente existen diversos modelos matemáticos que intentan representar la correlación de contenido de humedad de la muestra vs. actividad de agua a una temperatura específica, es decir, dichos modelos buscan relacionar el contenido de humedad con las condiciones higrotérmicas en las que se encuentra la muestra.

Citando a Peng et al. (2007) los modelos de sorción se pueden dividir en diversas categorías: modelos basados en la cinética de monocapa (BET), basados en cinética de multicapa (GAB), semiempíricos (Ferro – Fontan, Henderson, Chung – Pfoest y Halsey) y modelos empíricos (Smith y Oswin). Ahora bien, esta clasificación no es la única ya que de acuerdo con Matiauda (1999) los modelos de sorción también se pueden categorizar según la forma en que se calculan las constantes: funciones lineales o linealizables en los cuales se pueden calcular las constantes de manera exacta, y no lineales en los que el cálculo se realiza por prueba y error y que se caracterizan por tener más de dos parámetros en la ecuación.

Mientras que Estrada (2016) nos plantea que existen aún más categorías, tal es el caso de la categoría por tipo de modelo en la que se consideran los siguientes: modelos cinéticos los cuales representan el estado transitorio del proceso de sorción, modelos en equilibrio que representan un estado dinámico en el que la sorción y desorción se dan por igual; estocásticos deducidos mediante procesos de Markov y modelos moleculares que se fundamentan en teorías de densidad local cuántica funcional y de Hartree – Fock. De igual manera aborda una

clasificación por escala que se divide en tres grupos: escala de poro, macroscópicos y moleculares.

Modelo Langmuir.

Dicho modelo fue obtenido con base en las teorías cinéticas y de acuerdo a lo recopilado por (Atkins, 1999; Hartley, 2006) en este modelo dicho proceso se aborda como la adsorción de vapor en una monocapa localizada en una superficie homogénea en la que existe una cantidad definida de sitios de sorción que poseen una energía uniforme. También se plantea que cada sitio de sorción posee la cualidad de adsorber solo una molécula de vapor creando de esta forma una unión suficientemente resistente para evitar el desplazamiento de la misma. La ecuación del modelo se aprecia a continuación (*Ecuación 3*):

$$X = \frac{X \cdot a_w}{1 + c \cdot a_w} \cdot X_m \quad (3)$$

Donde:

X: contenido de humedad $\left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right]$

X_m: contenido de humedad en monocapa $\left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right]$

a_w: actividad de agua [adimensional]

c: constante [adimensional]

Modelo Brunauer – Emmett – Teller (BET).

Brunauer et al. (1938) mencionan plantean que la adsorción se produce en una multicapa, es decir la sorción inicial se da por la unión de moléculas de agua con sitios de sorción formando

así una capa inicial es decir la monocapa, posterior a esto las moléculas unidas a dichos sitios se convierten en nuevos sitios de sorción o en sitios secundarios de sorción permitiendo de esta manera que nuevas moléculas de agua se unan a estas y formando a su vez capas sucesivas por encima de la monocapa a este grupo de capas nuevas se le conoce como multicapa.

De esta forma dicho modelo queda representado por la *Ecuación 4*:

$$X = \frac{c \cdot a_w}{(1 - a_w)(1 + c \cdot a_w)} \cdot X_m \quad (4)$$

Donde:

X: contenido de humedad $\left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right]$

X_m: contenido de humedad en monocapa $\left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right]$

a_w: actividad de agua [adimensional]

c: constante relacionada con la energía de adsorción [adimensional]

A su vez, el parámetro c se ve definido por la *Ecuación 5* conocida como Ecuación de Arrhenius:

$$c = c_g = c_0 \cdot e^{\left(\frac{H_1 - H_m}{R \cdot T} \right)} \quad (5)$$

Donde:

c₀: constante [adimensional]

H₁: entalpia molar de la monocapa $\left[\frac{\text{J}}{\text{mol}} \right]$

H_m : entalpia molar de la condensación del agua $\left[\frac{J}{mol}\right]$

R : constante universal de los gases $8.314 \frac{J}{Kmol}$

T : temperatura absoluta [K]

Es importante mencionar que dicho modelo también se apoya en la determinación del área de sorción de superficie que menciona Skaar (1988) dicha determinación se lleva a cabo a partir de la *Ecuación 6*.

$$S = \frac{X_m \cdot N_A \cdot A_m}{M_{wat}} \quad (6)$$

Donde:

S : área de sorción de la superficie $\left[\frac{m^2}{g}\right]$

X_m : contenido de humedad de la monocapa [%]

N_A : número de Avogadro $6 \times 10^{23} \frac{moléculas}{kgmol}$

A_m : área de la molécula de agua $1.06 \times 10^{-19} \frac{m^2}{molécula}$

M_{wat} : peso molecular del agua $18 \frac{kg}{kgmol}$

Modelo Guggenheim – Anderson – De Boer (GAB).

Este modelo es considerado como una extensión del modelo de BET dado a que establece que las capas sucesivas a la monocapa son idénticas termodinámicamente hablando, pero con una diferencia en cuanto al agua con base a lo mencionado por Hartley (2006), sin embargo, es equivalente cuando el valor del parámetro k es posee un valor de 1. Ahora bien, el modelo GAB

maneja un parámetro más ya que considera la disparidad de la energía de sorción entre la monocapa y la multicapa, y se ajusta de mejor forma a la sigmoide de sorción de datos obtenidos empíricamente para productos alimenticios.

La ecuación que define dicho modelo es la siguiente (*Ecuación 7*):

$$X = \frac{C_g \cdot k \cdot a_w}{(1 - a_w \cdot k) [1 + k \cdot (C_g - 1) \cdot a_w]} \cdot X_m \quad (7)$$

Donde:

X: contenido de humedad $\left[\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}} \right]$

X_m: contenido de humedad de la monocapa $\left[\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}} \right]$

a_w: actividad de agua [adimensional]

C_g: constante relacionada con la energía de adsorción en la monocapa [adimensional]

k: constante relacionada con la energía de adsorción en la multicapa [adimensional]

Los parámetros C_g y k se ven definidos por la ecuación de Arrhenius, en el caso de C_g s retoma la *Ecuación 5* mientras que para el parámetro k se tiene la *Ecuación 8*:

$$k = k_0 \cdot e^{\left(\frac{H_L - H_m}{R \cdot T} \right)} \quad (8)$$

Donde:

k₀: constante [adimensional]

H_L : entalpia molar de la monocapa $\left[\frac{J}{mol}\right]$

H_m : entalpia molar de la condensación del agua $\left[\frac{J}{mol}\right]$

R : constante universal de los gases $8.314 \frac{J}{mol \cdot K}$

T : temperatura absoluta [K]

Se tiene conocimiento de diversos modelos, sin embargo, ahora mismo se abordan los que usualmente son utilizados en la representación de dicho proceso o bien los tres modelos que suelen ajustarse de mejor manera a los fines que se buscan en este estudio. Otros modelos que son de relevancia en el fenómeno de adsorción de acuerdo a lo publicado por autores como (Hailwood & Horrobin, 1946; Yanniotis & Blahovec, 2009; Zimm & Lundberg, 1956) son: el modelo de Zimm – Lundberg que intenta explicar la formación de clusters en dicho proceso llevado a cabo en materiales de tipo polimérico, el modelo Blahovec and Yanniotis que está basado en la sorción de una fracción del agua por la superficie del sólido formando así una monocapa conforme al modelo de Langmuir y generando uniones débiles en la multicapa causando de esta manera que el agua se comporte como un disolvente y por último pero no menos relevante el modelo Hailwood – Horrobin que se fundamenta en considerar la sorción como un fenómeno de solución ya que asume que el agua se encuentra de dos formas diferentes en el sólido, como agua de hidratación entre moléculas y la superficie de sorción y como agua en disolución de polímero, por esta razón se considerarían tres componentes para la pared celular: madera seca, hidratada y agua disuelta.

Capítulo III. Metodología

En el apartado que se presenta a continuación se detallará la experimentación que fue requerida para la obtención, análisis e interpretación de parámetros utilizando la reducción de suma de errores cuadráticos en secado de madera de encino. A partir de dicho secado y comparativa con dos tipos distintos de madera se obtendrán las cinéticas de desorción de madera a una determinada temperatura en seis humedades relativas diferentes para así a su vez elaborar las isothermas de desorción correspondientes y lograr su interpretación por medio de la reducción de suma de errores cuadráticos, dichos parámetros se obtendrán bajo la ejecución del método gravimétrico.

3.1 Materiales y equipo

Para la experimentación se cuenta con un horno de secado horizontal modelo: 9023A (*Figura 13*) de la marca ECOSHEL ubicado en el Instituto Tecnológico de Oaxaca. Dicho horno se utilizó para mantener las muestras de madera a las condiciones elegidas, es de esta manera que se recopilaron datos para la obtención de cinéticas de desorción. El horno proporciona un flujo constante de aire con velocidad y temperatura uniforme.

El aire que fluye dentro de la cámara interna de acero inoxidable con medidas de 350x350x350 mm se calienta dado al voltaje requerido por el mismo horno el cual es de 1100v/60Hz el cual a su vez proporciona un poder de calentamiento de 1.2 KW según lo establecido por ECOSHEL (2021).



Figura 13 Horno horizontal ECOSHEL Modelo: 9023A

Fuente: ECOSHEL (2021)

A su vez se contó con una balanza analítica de precisión (*Figura 14*) marca VELAB Modelo: VE – 204 que cuenta con una capacidad de pesaje con un límite de 220 g una sensibilidad de ± 0.0001 g que nos permite tener mayor asertividad en el momento de pesaje cuando se considera su repetibilidad del ± 0.0002 g y su tiempo de estabilización de ≤ 8 s conforme a lo especificado por Admin (2022).



Figura 14 Balanza analítica de precisión VELAB Modelo: VE – 204

Fuente: Admin (2022)

De igual manera se adquirieron frascos de cristal y tapa metálica con dimensiones de 11 cm de alto y un diámetro de 8 cm que se aprecian en la *Figura 15*, estos se adquirieron en la distribuidora de envases de vidrio “CATOSA” ubicada en la calle Soconusco #214 colonia Volcanes.



Figura 15 Frasco de cristal a utilizar

Fuente: Por el autor

A su vez se elaboraron bases con forma de trípode (*Figura 16*) esto por medio de la unión de un guardapizza o sepi a un círculo de tela para tejer tapetes, cabe mencionar que ambas piezas son de plástico al igual que la rafia que se utilizó para dicha unión. Obteniendo como resultado final:



Figura 16 Base trípode elaborada

Fuente: Por el autor

En las *Tabla 4 y 5* se concentran los reactivos que se adquirieron para llevar a cabo la metodología planeada, así como la HR que generan en las dos temperaturas a trabajar.

Tabla 4 Sales adquiridas y Humedad Relativa (HR) correspondiente @ 35

Sal	Formula	Humedad relativa [%]
Acetato de Potasio	CH ₃ CO ₂ K	20.7
Bromuro de Potasio	KBr	79.78
Carbonato de Potasio	K ₂ CO ₃	43.18
Hidróxido de Potasio	KOH	6.73
Sílica gel	SiO ₂	0
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	96.71

Fuente: Greenspan (1977)

Tabla 5 Sales adquiridas y Humedad Relativa (HR) correspondiente @ 45

Sal	Formula	Humedad relativa [%]
Acetato de Potasio	CH ₃ CO ₂ K	19.80
Bromuro de Potasio	KBr	79.18
Carbonato de Potasio	K ₂ CO ₃	43.18
Hidróxido de Potasio	KOH	5.60
Sílica gel	SiO ₂	0
Sulfato de Potasio	K ₂ SO ₄	96.12

Fuente: Greenspan (1977)

3.2 Selección y preparación de las muestras

La madera se obtuvo de la Carpintería y Ebanistería “Sánchez” ubicada en la calle Zempoaltepetl #313 de la Colonia Volcanes, situada en la Zona Norte del Municipio de Oaxaca

de Juárez. Dicha madera es de las siguientes especies: encino (*Quercus laurina*. Humb. & Bonpl.), cedro rojo (*Cedrela odorata*. L) y pino (*Pinus oaxacana*. Mirov) las cuales son provenientes de los municipios de San Pedro Yoloix en la Sierra Norte, José Chacalapa en San Pedro Pochutla e Ixtlán de Juárez en la Sierra Norte respectivamente.

Una vez obtenida la madera se procedió a rociarla con agua a través de un dispersor y se embolsó para su correcto traslado a laboratorio, en donde se etiquetó por especie y se almacenó bajo refrigeración evitando así una degradación pronunciada y la mayor pérdida de humedad posible. Para continuar se cortaron doce muestras de cada tipo de madera, a continuación, se muestra (Tabla 6) el intervalo de peso en el que se encuentran las muestras de cada especie.

Tabla 6 Intervalo de peso en muestras

Madera	Peso [g]
Encino	0.8043 – 1.1625
Cedro	0.2948 – 0.4776
Pino	0.5309 – 0.6967

Fuente: Elaborada por el autor

Esto dado a que son muestras demasiado pequeñas y no se pudieron obtener dimensiones exactas ni cortes netamente regulares.

Para continuar con la preparación de muestras, se etiquetaron y rotularon los frascos, se resalta que se trabajó un reactivo por frasco, es así como se obtuvieron doce recipientes rotulados a los cuales se les colocó una capa uniforme de la sal correspondiente al rotulo. Mientras esto se llevaba a cabo, las muestras anteriormente mencionadas se humedecieron una vez más apoyados por un atomizador con la finalidad de que mantuvieran en la mayor humedad posible antes de ser

depositadas en los frascos. Ya que se depositó la cantidad suficiente de sal, con ayuda de una piseta se humedeció la misma sin llegar a disolver el reactivo.

Para finalizar la preparación con ayuda de una pinza de disección se colocó una base trípode por frasco y encima de la misma se posicionó una muestra de cada tipo de madera, teniendo como resultado tres muestras de diferente madera por frasco (*Figura 17*).



Figura 17 Frascos resultantes

Fuente: Por el autor

Dando una contabilidad final de 12 frascos y 36 muestras de madera, que se colocaron en hornos a las temperaturas designadas como se muestra en la *Figura 18*.



Figura 18 Muestras colocadas en el horno

Fuente: Por el autor

3.3 Diseño experimental

Se seleccionó un diseño experimental que consiste en colocar una muestra de cada tipo de madera por frasco, en dicho frasco se contará con un tipo de sal con las que se trabajará, la cual creará una atmósfera específica dependiendo de la temperatura a la que se esté trabajando (35 °C o 45 °C) tal como se muestra en la *Tabla 7*.

Tabla 7 Experimentos de secado

Experimento	Temperatura [°C]	Humedad relativa [%]	Muestras
1	35	0	Encino 1
			Pino 1
			Cedro 1
2	35	6.73	Encino 2
			Pino 2
			Cedro 2
3	35	20.7	Encino 3

			Pino 3 Cedro 3
4	35	43.18	Encino 4 Pino 4 Cedro 4
5	35	79.78	Encino 5 Pino 5 Cedro 5
6	35	96.71	Encino 6 Pino 6 Cedro 6
7	45	0	Encino 7 Pino 7 Cedro 7
8	45	5.6	Encino 8 Pino 8 Cedro 8
9	45	19.8	Encino 9 Pino 9 Cedro 9
10	45	43.18	Encino 10 Pino 10 Cedro 10
11	45	79.18	Encino 11 Pino 11 Cedro 11
12	45	96.12	Encino 12 Pino 12 Cedro 12

Fuente: Elaborada por el autor

3.3.1 Recolección de datos de pesaje

Los pesajes se realizaron en lapsos de 72 horas y se detuvieron una vez que las muestras no presentaron variación alguna en su peso, dichos pesajes se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química Cuantitativa tratando de cuidar las condiciones ambientales y de ejecución en la mayor medida posible. A continuación, en las *Tablas 8, 9 y 10* se recopilan los datos de pesaje de los tres tipos de madera a una temperatura de 35 °C.

Tabla 8 Pesaje de muestras de encino @ 35 °C en g

Encino @ 35 °C						
Horas	Humedad relativa					
	0	6.73	20.7	43.18	79.78	96.71
0	0.8043	1.0623	0.8252	1.0231	0.8739	0.8043
72	0.6783	0.9655	0.743	0.9569	0.8411	0.6783
144	0.6772	0.964	0.7419	0.9558	0.8406	0.6772
216	0.6766	0.9634	0.7415	0.9554	0.8402	0.6766
288	0.6765	0.963	0.7432	0.955	0.84	0.6765
360	0.6763	0.9627	0.7446	0.9544	0.8398	0.6763
432	0.6763	0.9627	0.7447	0.9544	0.84	0.6763
504	0.6763	0.9626	0.7449	0.9545	0.8402	0.6763
576	0.6763	0.9626	0.745	0.9546	0.8404	0.6763
648	0.6764	0.9626	0.7448	0.9542	0.8404	0.6764
720	0.6768	0.9624	0.7452	0.9546	0.8411	0.6768
792	0.677	0.9626	0.7449	0.954	0.8391	0.677
864	0.6766	0.9623	0.7442	0.9534	0.839	0.6766
936	0.6764	0.962	0.7444	0.9535	0.8395	0.6764
1008	0.6758	0.9619	0.7446	0.9535	0.8399	0.6758
1080	0.677	0.9621	0.744	0.9536	0.8396	0.677

1152	0.6769	0.9618	0.744	0.9536	0.839	0.6769
1224	0.6767	0.9616	0.7442	0.9536	0.8388	0.6767
1296	0.6761	0.9616	0.7442	0.9537	0.8388	0.6761
1368	0.6767	0.9618	0.7441	0.9536	0.8396	0.6767
1440	0.6762	0.9617	0.7436	0.9535	0.8391	0.6762
1512	0.6765	0.9617	0.7442	0.9538	0.84	0.6765
1584	0.6761	0.9617	0.7442	0.9538	0.8402	0.6761
1656	0.6764	0.9618	0.7399	0.954	0.8404	0.6764
1728	0.676	0.9617	0.7437	0.9538	0.8403	0.676
1800	0.676	0.9617	0.7438	0.954	0.8404	0.676

Fuente: Elaborada por el autor

En la *Tabla 8* se aprecia que las muestras de madera de encino se estabilizaron con respecto a sus pesos en la hora 1,800 es decir después de 75 días transcurridos.

Tabla 9 Pesaje de muestras de pino @ 35 °C en g

Pino @ 35 °C						
Horas	Humedad relativa					
	0	6.73	20.7	43.18	79.78	96.71
0	0.5309	0.5367	0.6627	0.6967	0.6422	0.6991
72	0.3925	0.4123	0.506	0.5306	0.5352	0.6448
144	0.3924	0.4111	0.5046	0.5593	0.5332	0.6321
216	0.3922	0.411	0.5046	0.5587	0.5327	0.6275
288	0.3921	0.4109	0.5044	0.558	0.5315	0.628
360	0.3923	0.4108	0.5042	0.5576	0.5306	0.6292
432	0.3917	0.4108	0.5044	0.5579	0.5306	0.6283
504	0.391	0.4107	0.5046	0.5577	0.5306	0.627
576	0.3903	0.4107	0.5046	0.558	0.5306	0.6258
648	0.3921	0.411	0.5026	0.558	0.531	0.6298

720	0.3929	0.4112	0.5047	0.558	0.5304	0.6254
792	0.3926	0.4112	0.5044	0.5575	0.5296	0.6254
864	0.3924	0.4108	0.5027	0.5573	0.5301	0.6235
936	0.3926	0.4108	0.5029	0.5572	0.5299	0.625
1008	0.3933	0.411	0.5029	0.5572	0.5297	0.6299
1080	0.3921	0.4106	0.5027	0.5571	0.5299	0.6255
1152	0.3925	0.4107	0.503	0.5571	0.5286	0.6243
1224	0.3929	0.4108	0.5035	0.557	0.5283	0.6222
1296	0.3932	0.411	0.5044	0.557	0.5281	0.6208
1368	0.3927	0.4107	0.5046	0.557	0.5293	0.6233
1440	0.3927	0.4102	0.504	0.5567	0.5286	0.6236
1512	0.3929	0.4109	0.5045	0.5571	0.5293	0.625
1584	0.3931	0.4109	0.5045	0.5573	0.5293	0.6276
1656	0.3928	0.4102	0.5039	0.557	0.5281	0.6244
1728	0.3929	0.4109	0.5044	0.5573	0.5294	0.644
1800	0.3929	0.4109	0.5044	0.5573	0.5295	0.6441

Fuente: Elaborada por el autor

Así mismo, en la *Tabla 9* se recopilaron los datos de madera de pino y su propia estabilización.

Tabla 10 Pesaje de muestras de cedro @ 35 °C en g

Cedro @ 35 °C						
Horas	Humedad relativa					
	0	6.73	20.7	43.18	79.78	96.71
0	0.3202	0.3804	0.2948	0.4776	0.4524	0.3202
72	0.2579	0.3064	0.2361	0.4118	0.42	0.2579
144	0.2572	0.305	0.2353	0.4102	0.4174	0.2572
216	0.2568	0.3049	0.2348	0.4097	0.417	0.2568

288	0.2568	0.3045	0.234	0.4143	0.4153	0.2568
360	0.2568	0.3043	0.2333	0.4205	0.4149	0.2568
432	0.2563	0.304	0.234	0.4203	0.4152	0.2563
504	0.256	0.3038	0.2342	0.4202	0.4153	0.256
576	0.256	0.3038	0.2344	0.4201	0.4156	0.256
648	0.256	0.304	0.2343	0.4197	0.415	0.256
720	0.2566	0.3041	0.2347	0.4196	0.4154	0.2566
792	0.2567	0.3037	0.2332	0.4192	0.4152	0.2567
864	0.2568	0.3041	0.2329	0.4187	0.4145	0.2568
936	0.2566	0.3038	0.2335	0.4187	0.4144	0.2566
1008	0.2564	0.3034	0.2341	0.4187	0.4143	0.2564
1080	0.2562	0.3039	0.2339	0.4184	0.415	0.2562
1152	0.2562	0.3039	0.2339	0.418	0.4148	0.2562
1224	0.2565	0.3037	0.2341	0.418	0.4145	0.2565
1296	0.2566	0.3037	0.2345	0.4177	0.4141	0.2566
1368	0.2567	0.3034	0.2343	0.418	0.4155	0.2567
1440	0.2566	0.3034	0.2342	0.418	0.4141	0.2566
1512	0.2565	0.3036	0.2344	0.4183	0.415	0.2565
1584	0.2564	0.3039	0.2344	0.4184	0.415	0.2564
1656	0.2561	0.3034	0.2346	0.4179	0.4139	0.2561
1728	0.2562	0.3036	0.2343	0.4182	0.4146	0.2562
1800	0.2562	0.3035	0.2343	0.4182	0.4145	0.2562

Fuente: Elaborada por el autor

En la *Tabla 10* se aprecian los datos de madera de cedro y su estabilización dada en la hora 1,800. Ahora bien, en las *Tablas 11, 12 y 13* se recopilan los datos de pesaje correspondientes a los tres tipos de madera a una temperatura de 45 °C

Tabla 11 Pesaje de muestras de encino @ 45 °C en g

Encino @ 45 °C						
Horas	Humedad relativa					
	0	5.6	19.8	43.18	79.18	96.12
0	0.7694	0.6696	0.7023	0.6675	0.6874	0.5632
72	0.6218	0.5804	0.6242	0.7572	0.6557	0.5662
144	0.6215	0.5802	0.624	0.757	0.655	0.566
216	0.6192	0.5793	0.6227	0.7382	0.6534	0.5604
288	0.6197	0.6223	0.6237	0.7335	0.6525	0.5627
360	0.6185	0.6031	0.635	0.7265	0.6519	0.5645
432	0.6185	0.6036	0.6348	0.7161	0.6512	0.564
504	0.6187	0.6033	0.6352	0.7255	0.6499	0.5636
576	0.6187	0.6039	0.635	0.7249	0.6457	0.5633
648	0.619	0.6038	0.6349	0.7236	0.6422	0.5615
720	0.6196	0.6035	0.6348	0.7228	0.6319	0.5591
792	0.6195	0.6034	0.6348	0.7226	0.6317	0.559
864	0.6196	0.6034	0.6348	0.7226	0.6317	0.5591
936	0.6196	0.6034	0.6348	0.7226	0.6317	0.5591

Fuente: Elaborada por el autor

En la *Tabla 11* se encuentran los datos de madera de encino y su estabilización en la hora 936, es decir, en el día 39.

Tabla 12 Pesaje de muestras de pino @ 45 °C en g

Pino @ 45 °C						
Horas	Humedad relativa					
	0	5.6	19.8	43.18	79.18	96.12
0	0.6848	0.5848	0.4407	0.6259	0.6721	0.6848
72	0.5156	0.4259	0.3518	0.7217	0.5821	0.5156

144	0.5153	0.4257	0.3531	0.7318	0.5817	0.5153
216	0.5139	0.4255	0.3572	0.7937	0.5756	0.5139
288	0.5137	0.4282	0.3568	0.7847	0.5766	0.5137
360	0.5142	0.4409	0.3568	0.7724	0.5737	0.5142
432	0.5142	0.4407	0.3562	0.7721	0.574	0.5142
504	0.5142	0.4408	0.356	0.7713	0.5745	0.5142
576	0.5143	0.4409	0.356	0.7785	0.5746	0.5143
648	0.5141	0.4408	0.3559	0.7767	0.5744	0.5141
720	0.5141	0.4408	0.3557	0.7658	0.5743	0.5141
792	0.5141	0.4408	0.3536	0.7655	0.5743	0.5141
864	0.5141	0.4408	0.3536	0.7655	0.5743	0.5141
936	0.5141	0.4408	0.3536	0.7655	0.5743	0.5141

Fuente: Elaborada por el autor

Por su cuenta la madera de pino y sus respectivos datos se pueden visualizar en la *Tabla 12*, la cual nos muestra una estabilización de igual manera en la hora 936.

Tabla 13 Pesaje de muestras de cedro @ 45 °C en g

Cedro @ 45 °C						
Horas	Humedad relativa					
	0	5.6	19.8	43.18	79.18	96.12
0	0.3955	0.4685	0.4008	0.3666	0.3822	0.4102
72	0.2869	0.3329	0.3105	0.5123	0.3188	0.3719
144	0.286	0.3325	0.3164	0.5115	0.3177	0.3714
216	0.2846	0.3302	0.331	0.5071	0.315	0.3661
288	0.2845	0.3296	0.3355	0.5011	0.3143	0.3665
360	0.2842	0.3392	0.334	0.49	0.3136	0.3664
432	0.284	0.3393	0.3348	0.4895	0.3132	0.3661
504	0.2839	0.3392	0.3351	0.4864	0.3132	0.3658

576	0.2836	0.3391	0.3355	0.4829	0.3133	0.3654
648	0.2835	0.339	0.3359	0.4805	0.313	0.3649
720	0.2835	0.339	0.3366	0.4768	0.313	0.3643
792	0.2835	0.339	0.3359	0.4766	0.313	0.3642
864	0.2835	0.339	0.3359	0.4766	0.313	0.3642
936	0.2835	0.339	0.3359	0.4766	0.313	0.3642

Fuente: Elaborada por el autor

Por último, los datos de madera de cedro trabajada a la temperatura ya indicada se recopilan en la *Tabla 13*.

3.3.2 Cálculo de contenido de humedad

Continuando con nuestra metodología, se debe realizar el cálculo de contenido de humedad, dicho cálculo se realizó mediante la colocación de tres muestras de cada tipo de madera a una temperatura de 55 °C.



Figura 19 Muestras de madera @ 55 °C

Fuente: Por el autor

En esta parte de la metodología se registró el peso de las muestras húmedas y posterior a un lapso de 72 horas se registró el peso de las muestras secas, dichos datos se observan en la *Tabla 14*.

Tabla 14 Muestras de madera @ 55 °C

Muestras húmedas			Muestras secas		
[g]			[g]		
Encino	Pino	Cedro	Encino	Pino	Cedro
0.7542	1.2500	0.6056	0.5692	0.7916	0.3510
0.7212	1.1904	0.7131	0.5506	0.7012	0.4459
0.6883	1.3410	0.6756	0.5320	0.8249	0.4333

Fuente: Elaborada por el autor

Con dichos datos se sacaron promedios para manejar solamente un dato por cada tipo de madera los cuales se sustituyeron en la fórmula de contenido de humedad (CH) presentada con anterioridad en el *Apartado 2.3.2*, dando como resultado lo plasmado en la *Tabla 15*.

Tabla 15 Determinación de humedad promedio @ 55 °C

Madera	Encino	Pino	Cedro
Humedad	0.325017569	0.579080344	0.725356125
Humedad	0.309843807	0.697661152	0.599237497
Humedad	0.293796992	0.625651594	0.559196861
Humedad promedio (MC)	0.309552789	0.63413103	0.627930161

Fuente: Elaborada por el autor

Una vez teniendo el contenido de humedad promedio (MC) por cada tipo de madera se procedió a determinar el contenido de humedad con respecto al muestreo realizado a las dos temperaturas trabajadas.

Tabla 16 Datos de madera @ 35 °C

Encino						
MC	0.30955279	0.30955279	0.30955279	0.30955279	0.30955279	0.30955279
P_H	0.8043	1.0623	0.8252	1.0231	0.8739	1.1625
P_S	0.61417914	0.81119296	0.63013878	0.78125907	0.66732705	0.88770763
Pino						
MC	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103
P_H	0.5309	0.5367	0.6627	0.6967	0.6422	0.6991
P_S	0.32488215	0.32843144	0.40553664	0.4263428	0.39299174	0.42781147
Cedro						
MC	0.627930161	0.627930161	0.62793016	0.62793016	0.62793016	0.62793016
P_H	0.3202	0.3804	0.2948	0.4776	0.4524	0.2976
P_S	0.196691484	0.233670958	0.18108885	0.29337868	0.2778989	0.18280883

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 17 Datos de madera @ 45 °C

Encino						
MC	0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789
P_H	0.7694	0.6696	0.7023	0.6675	0.6874	0.5632
P_S	0.587528816	0.511319594	0.53628995	0.509715993	0.52491202	0.430070483
Pino						
MC	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103
P_H	0.6848	0.5848	0.4407	0.6259	0.6721	0.7606
P_S	0.419060643	0.35786604	0.269684616	0.383017022	0.411288928	0.465446152
Cedro						

MC	0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161
P_H	0.3955	0.4685	0.4008	0.3666	0.3822	0.4102
P_S	0.24294654	0.287788758	0.246202208	0.225193936	0.234776656	0.251976411

Fuente: Elaborada por el autor

Utilizando los datos de la *Tabla 16* y el peso de la hora cero o peso de la muestra inicial a las diversas humedades relativas @ 35 °C y por medio del uso de la ecuación para el cálculo de CH se obtuvieron los datos que se plasman en la *Tabla 18, 19 y 20* que representan el contenido de humedad MC en muestras de los distintos tipos de madera.

Tabla 18 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de encino @ 35 °C

Encino @ 35 °C					
Humedad relativa					
0	6.73	20.7	43.18	79.78	96.71
0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789
0.104400916	0.190222365	0.179105335	0.224817773	0.260401477	0.39235032
0.102609908	0.188373236	0.177359688	0.22340979	0.25965222	0.43774815
0.101632994	0.187633585	0.176724907	0.222897796	0.259052813	0.4378608
0.101470175	0.187140484	0.179422725	0.222385802	0.25875311	0.438311399
0.101144537	0.186770658	0.181644458	0.221617811	0.258453407	0.439325246
0.101144537	0.186770658	0.181803153	0.221617811	0.25875311	0.438761998
0.101144537	0.186647383	0.182120544	0.221745809	0.259052813	0.438311399
0.101144537	0.186647383	0.182279239	0.221873808	0.259352516	0.437635501
0.101307356	0.186647383	0.181961849	0.221361814	0.259352516	0.441916189
0.101958632	0.186400833	0.182596629	0.221873808	0.260401477	0.439550546
0.10228427	0.186647383	0.182120544	0.221105817	0.257404446	0.439775845
0.101632994	0.186277557	0.181009677	0.220337826	0.257254595	0.435833106
0.101307356	0.185907732	0.181327068	0.220465824	0.258003852	0.436959603

0.100330443	0.185784456	0.181644458	0.220465824	0.258603259	0.4380861
0.10228427	0.186031007	0.180692287	0.220593823	0.258153704	0.429074123
0.102121451	0.185661181	0.180692287	0.220593823	0.257254595	0.429524722
0.101795813	0.185414631	0.181009677	0.220593823	0.256954891	0.433805411
0.100818899	0.185414631	0.181009677	0.220721821	0.256954891	0.435269857
0.101795813	0.185661181	0.180850982	0.220593823	0.258153704	0.432115665
0.100981718	0.185537906	0.180057506	0.220465824	0.257404446	0.426257881
0.101470175	0.185537906	0.181009677	0.22084982	0.25875311	0.436283704
0.100818899	0.185537906	0.181009677	0.22084982	0.259052813	0.440451743
0.101307356	0.185661181	0.174185784	0.221105817	0.259352516	0.431552417
0.10065608	0.185537906	0.180216201	0.22084982	0.259202665	0.43774815
0.10065608	0.185537906	0.180374897	0.221105817	0.259352516	0.4378608

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 19 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de pino @ 35 °C

Pino @ 35 °C					
Humedad relativa					
0	6.73	20.7	43.18	79.78	96.71
0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103
0.2081304	0.255360953	0.247729442	0.24453843	0.361860678	0.507205962
0.207822596	0.251707223	0.244277226	0.311855153	0.356771512	0.477519989
0.207206988	0.251402745	0.244277226	0.310447835	0.355499221	0.466767589
0.206899184	0.251098268	0.243784052	0.308805963	0.352445722	0.467936328
0.207514792	0.25079379	0.243290879	0.307867751	0.350155597	0.470741302
0.205667968	0.25079379	0.243784052	0.30857141	0.350155597	0.468637571
0.203513341	0.250489313	0.244277226	0.308102304	0.350155597	0.46559885
0.201358714	0.250489313	0.244277226	0.308805963	0.350155597	0.462793876
0.206899184	0.251402745	0.239345489	0.308805963	0.35117343	0.472143789
0.209361616	0.2520117	0.244523813	0.308805963	0.349646681	0.461858885
0.208438204	0.2520117	0.243784052	0.307633198	0.347611014	0.461858885

0.207822596	0.25079379	0.239592076	0.307164092	0.348883306	0.457417676
0.208438204	0.25079379	0.24008525	0.306929539	0.348374389	0.460923893
0.210592831	0.251402745	0.24008525	0.306929539	0.347865473	0.472377537
0.206899184	0.250184835	0.239592076	0.306694986	0.348374389	0.462092632
0.2081304	0.250489313	0.240331837	0.306694986	0.345066432	0.459287658
0.209361616	0.25079379	0.241564771	0.306460433	0.344303057	0.454378954
0.210285027	0.251402745	0.243784052	0.306460433	0.34379414	0.451106485
0.208746008	0.250489313	0.244277226	0.306460433	0.34684764	0.45695018
0.208746008	0.248966925	0.242797705	0.305756774	0.345066432	0.457651424
0.209361616	0.251098268	0.244030639	0.306694986	0.34684764	0.460923893
0.209977223	0.251098268	0.244030639	0.307164092	0.34684764	0.467001337
0.209053812	0.248966925	0.242551118	0.306460433	0.34379414	0.459521406
0.209361616	0.251098268	0.243784052	0.307164092	0.347102098	0.50533598
0.209361616	0.251098268	0.243784052	0.307164092	0.347356556	0.505569727

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 20 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de cedro @ 35 °C

Cedro @ 35 °C					
Humedad relativa					
0	6.73	20.7	43.18	79.78	96.71
0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161
0.31119047	0.311245535	0.303779888	0.403646651	0.511340999	0.636135454
0.307631597	0.305254204	0.299362167	0.398192948	0.501985078	0.637776513
0.305597956	0.304826252	0.296601092	0.396488666	0.500545706	0.633947376
0.305597956	0.303114443	0.292183371	0.412168061	0.494428373	0.635588435
0.305597956	0.302258539	0.288317865	0.433301157	0.492989001	0.637776513
0.303055904	0.300974682	0.292183371	0.432619445	0.49406853	0.635588435
0.301530672	0.300118778	0.293287801	0.432278588	0.494428373	0.632853337
0.301530672	0.300118778	0.294392231	0.431937732	0.495507902	0.630118239
0.301530672	0.300974682	0.293840016	0.430574306	0.493348844	0.640511611

0.304581135	0.301402634	0.296048877	0.43023345	0.494788216	0.638323533
0.305089545	0.299690825	0.28776565	0.428870024	0.49406853	0.632306318
0.305597956	0.301402634	0.286109005	0.427165742	0.491549628	0.630665259
0.304581135	0.300118778	0.289422295	0.427165742	0.491189785	0.632306318
0.303564314	0.298406969	0.292735586	0.427165742	0.490829942	0.639964591
0.302547493	0.30054673	0.291631156	0.426143173	0.493348844	0.631759298
0.302547493	0.30054673	0.291631156	0.424779748	0.492629158	0.630665259
0.304072724	0.299690825	0.292735586	0.424779748	0.491549628	0.630118239
0.304581135	0.299690825	0.294944446	0.423757178	0.490110256	0.630118239
0.305089545	0.298406969	0.293840016	0.424779748	0.495148059	0.627930161
0.304581135	0.298406969	0.293287801	0.424779748	0.490110256	0.619724868
0.304072724	0.299262873	0.294392231	0.425802317	0.493348844	0.633400357
0.303564314	0.30054673	0.294392231	0.426143173	0.493348844	0.64105863
0.302039083	0.298406969	0.295496662	0.424438891	0.48939057	0.623554005
0.302547493	0.299262873	0.293840016	0.42546146	0.491909471	0.638323533
0.302547493	0.298834921	0.293840016	0.42546146	0.491549628	0.638870552

Fuente: Elaborada por el autor

En cuanto a la temperatura de 45 °C se tienen los siguientes valores obtenidos y recopilados en las *Tablas 21, 22 y 23*; del uso de la relación matemática ya antes utilizada, destacando que en esta ocasión se tomaron valores de la *Tabla 17* y el peso de la hora cero o peso de la muestra inicial a las diversas humedades relativas @ 45 °C.

Tabla 21 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de encino @ 45 °C

Encino @ 45 °C					
Humedad relativa					
0	5.6	19.8	43.18	79.18	96.12
0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789	0.309552789
0.058331069	0.135102209	0.163922613	0.485533142	0.249161716	0.31652839

0.057820456	0.134711064	0.16354968	0.485140766	0.24782816	0.31606335
0.053905754	0.132950912	0.161125618	0.448257482	0.24478003	0.303042229
0.054756776	0.217047044	0.162990281	0.439036661	0.243065457	0.308390189
0.052714323	0.179497143	0.184060973	0.425303523	0.241922408	0.31257555
0.052714323	0.180475005	0.18368804	0.404900004	0.240588851	0.311412949
0.053054732	0.179888288	0.184433905	0.423341646	0.238112246	0.310482869
0.053054732	0.181061723	0.184060973	0.42216452	0.230110905	0.309785309
0.053565345	0.18086615	0.183874506	0.41961408	0.223443121	0.305599949
0.054586572	0.180279433	0.18368804	0.418044578	0.203820785	0.300019468
0.054416367	0.180083861	0.18368804	0.417652203	0.203439769	0.299786948
0.054586572	0.180083861	0.18368804	0.417652203	0.203439769	0.300019468
0.054586572	0.180083861	0.18368804	0.417652203	0.203439769	0.300019468

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 22 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de pino @ 45 °C

Pino @ 45 °C					
Humedad relativa					
0	5.6	19.8	43.18	79.18	96.12
0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103	0.63413103
0.230370851	0.190110133	0.304486717	0.884250462	0.415306759	0.505222455
0.229654965	0.189551264	0.309307163	0.910620048	0.414334206	0.504577913
0.226314159	0.188992396	0.324510106	1.072231664	0.399502784	0.481589217
0.225836901	0.196537119	0.323026892	1.048734014	0.401934164	0.479440741
0.227030046	0.232025258	0.323026892	1.016620559	0.39488316	0.474499245
0.227030046	0.23146639	0.320802071	1.015837304	0.395612574	0.473854702
0.227030046	0.231745824	0.320060464	1.013748624	0.396828265	0.473425007
0.227268675	0.232025258	0.320060464	1.032546744	0.397071403	0.471921074
0.226791417	0.231745824	0.319689661	1.027847214	0.396585127	0.469128055
0.226791417	0.231745824	0.318948054	0.999388948	0.396341989	0.46590534
0.226791417	0.231745824	0.31116118	0.998605693	0.396341989	0.465475645

0.226791417	0.231745824	0.31116118	0.998605693	0.396341989	0.465475645
0.226791417	0.231745824	0.31116118	0.998605693	0.396341989	0.465475645

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 23 Contenido de humedad calculado (MC) en muestras de cedro @ 45 °C

Cedro @ 45 °C					
Humedad relativa					
0	5.6	19.8	43.18	79.18	96.12
0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161	0.627930161
0.180918238	0.156751229	0.261158471	1.274928046	0.357886278	0.475931806
0.17721372	0.15536132	0.285122513	1.271375552	0.353200974	0.473947494
0.171451135	0.147369347	0.344423362	1.251836838	0.341700682	0.452913779
0.171039522	0.145284485	0.362701021	1.225193136	0.338719125	0.454501229
0.169804682	0.178642285	0.356608468	1.175902289	0.335737568	0.454104366
0.168981456	0.178989762	0.359857829	1.17368198	0.334033821	0.452913779
0.168569843	0.178642285	0.36107634	1.159916068	0.334033821	0.451723191
0.167335003	0.178294808	0.362701021	1.144373909	0.334459758	0.450135741
0.16692339	0.177947331	0.364325702	1.133716428	0.333181948	0.448151428
0.16692339	0.177947331	0.367168893	1.117286145	0.333181948	0.445770253
0.16692339	0.177947331	0.364325702	1.116398022	0.333181948	0.44537339
0.16692339	0.177947331	0.364325702	1.116398022	0.333181948	0.44537339
0.16692339	0.177947331	0.364325702	1.116398022	0.333181948	0.44537339

Fuente: Elaborada por el autor

Una vez teniendo dichos datos se realizó el cálculo de contenido de humedad de equilibrio (CHE) para ambas temperaturas, esto se llevó a cabo mediante la obtención del promedio de los últimos tres valores de MC calculada obtenidos anteriormente por cada humedad relativa.

Tabla 24 Contenido de humedad en equilibrio (CHE) de madera @ 35 °C

Madera	Humedad relativa					
	0	6.73	20.7	43.18	79.78	96.71
Encino	0.100873172	0.185578998	0.178258961	0.221020484	0.259302566	0.435720456
Pino	0.209259014	0.25038782	0.243373074	0.306929539	0.346084265	0.490142371
Cedro	0.302378023	0.298834921	0.294392231	0.425120604	0.49094989	0.633582697

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 25 Contenido de humedad en equilibrio (CHE) de madera @ 45 °C

Madera	Humedad relativa					
	0	5.6	19.8	43.18	79.18	96.12
Encino	0.054529837	0.180083861	0.18368804	0.417652203	0.203439769	0.299941961
Pino	0.226791417	0.231745824	0.31116118	0.998605693	0.396341989	0.465475645
Cedro	0.16692339	0.177947331	0.364325702	1.116398022	0.333181948	0.44537339

Fuente: Elaborada por el autor

Capítulo IV. Resultados y Análisis de resultados

4.1 Cinéticas de desorción

Con los datos obtenidos de contenido de humedad se construyeron las siguientes gráficas en las que se aprecian las cinéticas de desorción de los tipos de madera trabajados a las diferentes humedades relativas generadas por las respectivas temperaturas empleadas; *Figura 20, 21 y 22* para 35 °C y *Figura 23, 24 y 25* para 45 °C. En dichas gráficas se puede apreciar de forma detallada la manera en la que el contenido de humedad fue evolucionando con respecto al paso del tiempo, cabe resaltar que cada humedad relativa a la que se trabajó posee una línea específica que la representa, así como también ha de remarcarse la notable estabilización de los valores de contenido de humedad en los distintos casos.

Cinéticas @ 35 °C.

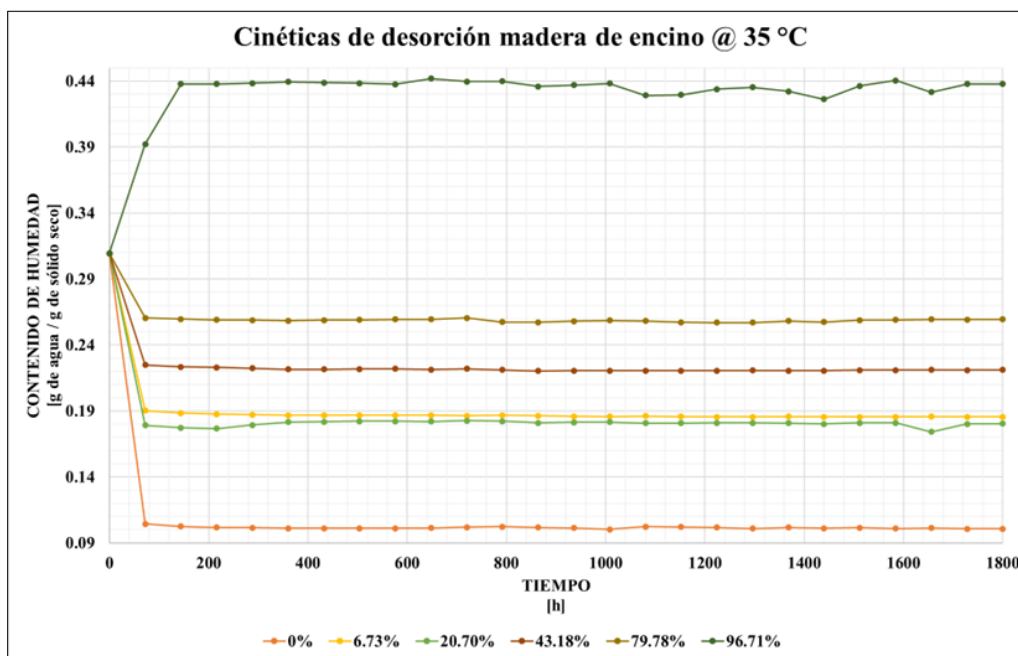


Figura 20 Cinéticas de desorción de madera de encino @ 35 °C y a diferentes humedades relativas (HR)

En lo que a la madera de encino trabajada @ 35 °C respecta, se puede observar que la HR a la que la pérdida de agua se estabiliza de forma casi inmediata es la 6.73%, sin embargo, de las cinco HR restantes, sólo una presenta una desestabilidad más marcada siendo esta la HR con un valor de 96.71%. Por su parte porcentajes de humedad relativa como 6.73% y 20.70% reflejan un comportamiento muy similar e incluso podría considerarse que se estabilizan de manera simultánea. Ahora bien, se ha de mencionar y visibilizar que @ 0% de HR la madera presenta una mayor pérdida de agua, mientras que con un 96.71% se presenta una diferencia altamente significativa, ya que bajo esta condición la madera de encino no presenta desorción sino por el contrario, presenta una sorción de agua debido al alto contenido de humedad relativa, dicha adquisición oscila alrededor de 0.13 en cuanto a contenido de humedad.

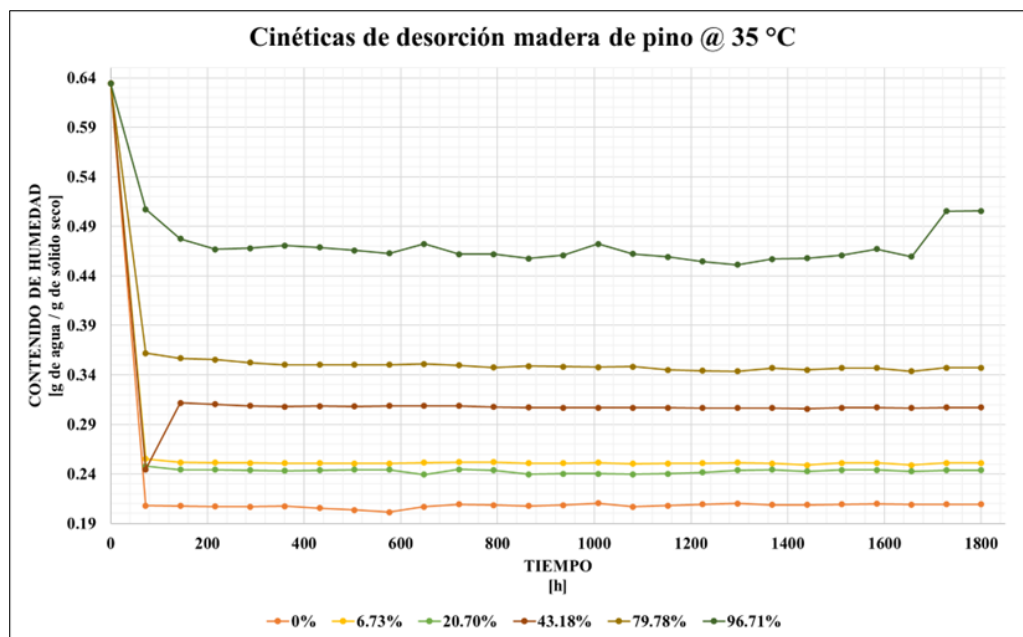


Figura 21 Cinéticas de desorción de madera de pino @ 35 °C y a diferentes humedades relativas (HR)

Por su parte la madera de pino a estas mismas condiciones refleja de igual manera que a una HR de 6.73% la estabilidad se alcanzó casi de forma instantánea, mientras que nuevamente con una HR de 96.71% se tuvo mayor variación, sólo que esta ocasión a diferencia de con la madera de encino se tuvieron variaciones aún más marcadas sobre todo en el intervalo 1,560 – 1,720 horas dada una pérdida de agua seguida por una absorción repentina, sin embargo este comportamiento de una desorción – sorción se presentó de igual manera en el inicio del proceso con una HR de 43.18%. De la misma forma que con el encino, el pino refleja una mayor desorción a la HR de 0%, no obstante, en esta ocasión, aunque existen dos HR (43.18% y 96.71%) en las que existe una fracción de sorción, estas no muestran un comportamiento errático durante el tiempo empleado, así mismo en este tipo de madera nuevamente los porcentajes 6.73% y 20.70% presentan comportamientos similares en cuanto a su hora de estabilización y sus valores de desorción. En comparación con los otros dos tipos de madera, el pino presentó una mayor pérdida de agua con respecto a su propio contenido de humedad inicial, de igual manera cabe mencionar que este tipo de madera en ninguna ocasión exhibe comportamiento de sorción.

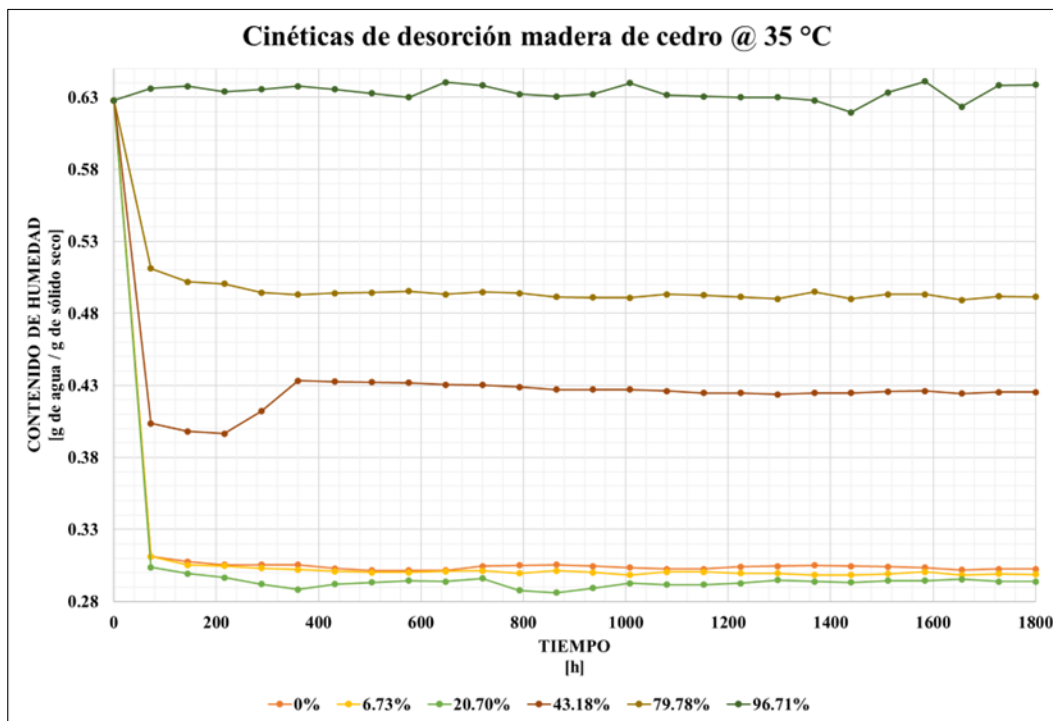


Figura 22 Cinéticas de desorción de madera de cedro @ 35 °C y a diferentes humedades relativas (HR)

En el caso de madera de cedro, de las tres fue la que mayor inestabilidad de forma general presentó, ya que en la mayoría de HR a las que se trabajó fue la que más variaciones mostró durante el procedimiento, destacando sobre todo la variabilidad @ 96.71% de HR ya que a esta humedad relativa no solamente fue más cambiante sino que fue el único porcentaje de humedad relativa en que se percibió un comportamiento de sorción con un valor ganado estimado de 0.01 respecto a contenido de humedad; pese a esto, dada su naturaleza y contenido de humedad inicial propio se puede destacar la pérdida de agua que presenta con una HR de 20.70% que es seguida por los valores de humedad relativa de 0% y 6.73% a diferencia de las dos maderas anteriores, en las que el mejor secado se presentaba solamente @ 0% y con una diferencia bastante notoria entre esa condición y las posteriores en cuanto a mejores resultados

con respecto a desorción, de igual manera se debe mencionar que en este caso en específico por el contrario de la madera de encino, no existe una gran sorción, incluso se puede considerar despreciable.

Cinéticas @ 45 °C.

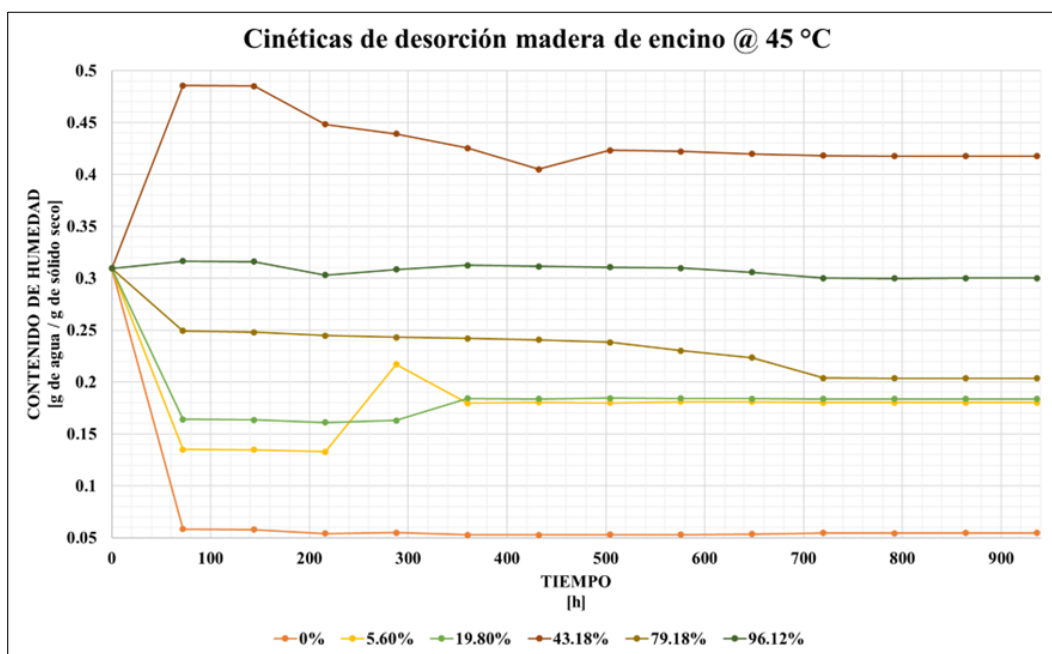


Figura 23 Cinéticas de desorción de madera de encino @ 45 °C y a diferentes humedades relativas (HR)

Ahora bien, en la *Figura 23* se muestran las cinéticas resultantes de trabajar madera de encino @ 45 °C y a distintas humedades relativas, en dicha figura se aprecia que a una HR de 0% se presenta un valor de desorción notable en comparación a otros porcentajes de humedad relativa, así mismo refleja una estabilización lograda antes de la hora 100; mientras que porcentajes de 5.60% y 19.80% aunque en una primer instancia muestran una discrepancia aproximadamente en la hora 360 logran una estabilidad muy próxima en cuanto la desorción presentada. En esta ocasión, igual que en casos anteriores existe una HR (43.18%) con la cual se

tiene una variación más presente en contraste con los demás porcentajes, esto derivado de que en dicha HR se genera un fenómeno de sorción, ganando la madera un aproximado de 0.14 en cuanto a contenido de humedad. Se considera relevante el enfocar la HR con valor de 96.12%, esto debido a que con dicha HR la madera no presenta ni sorción ni desorción ya que después de una ligera variación presentada, el valor de contenido de humedad se iguala con el contenido de humedad inicial.

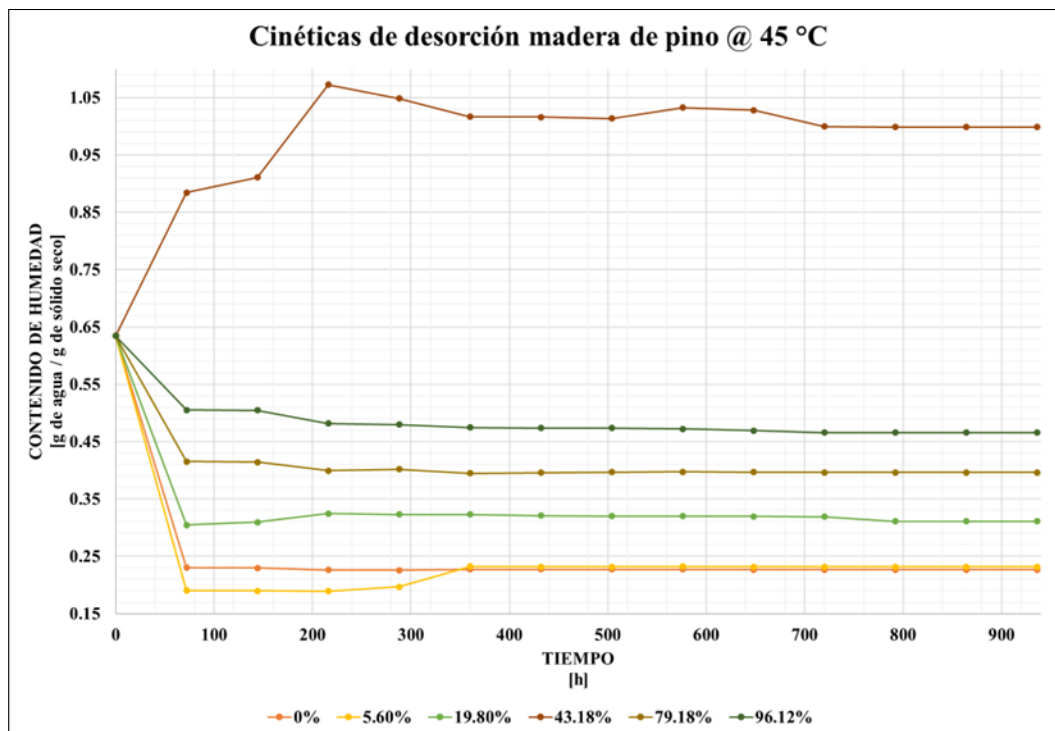


Figura 24 Cinéticas de desorción de madera de pino @ 45 °C y a diferentes humedades relativas (HR)

En cuanto a la madera de pino respecta nuevamente es la madera que mejor comportamiento de desorción nos presenta ya que se logra visualizar de forma notoria que la única HR en la que presenta mayor inestabilidad es la HR con valor de 43.18% debido a que no solamente es tardía en cuanto a su estabilización sino que bajo esta condición se produce un

aumento en el contenido de humedad de aproximadamente 0.31, fuera de dicho fenómeno, por su parte los porcentajes de humedad relativa restantes muestran una desorción correcta, destacando la reducción en el contenido de humedad presentado por la HR con valor de 0% ya que una vez pérdida la humedad se logró una estabilización poco antes de la hora 100, dicho valor es seguido por el porcentaje de humedad relativa de 5.60% que una vez teniendo una variación de desorción – sorción se estabilizó en un valor muy cercano al porcentaje ya antes destacado.

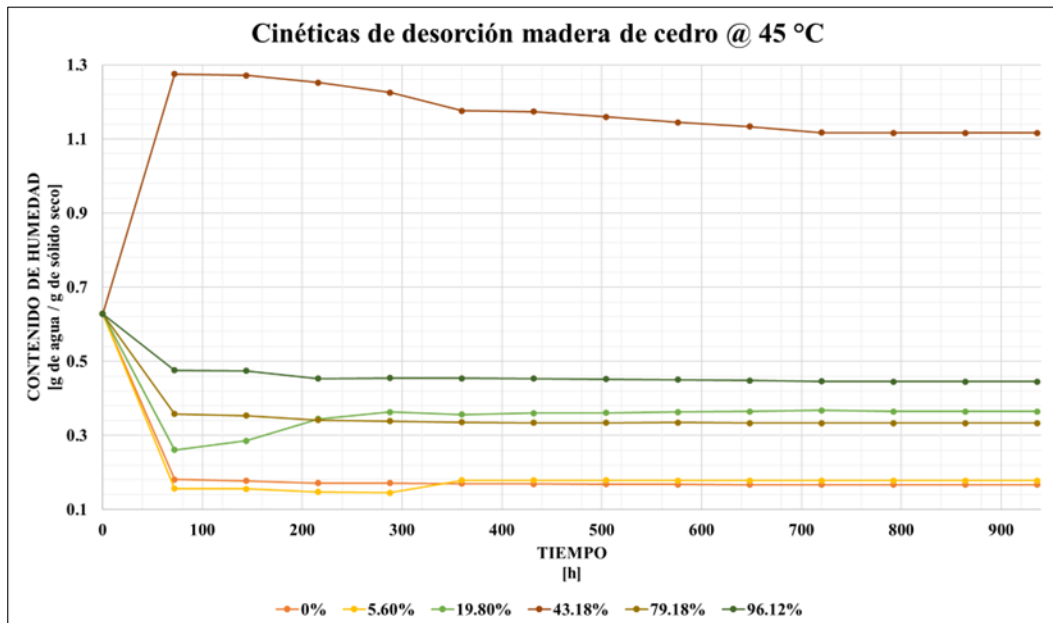


Figura 25 Cinéticas de desorción de madera de cedro @ 45 °C y a diferentes humedades relativas (HR)

Obteniendo las cinéticas generadas por la madera de cedro @ 45 °C, se puede apreciar que al igual que con la madera de pino la única HR con la que no se obtuvo un fenómeno de desorción fue con el valor de 43.18% ya que existe un aumento en el contenido de humedad que fluctúa cerca del 0.41 con este mismo valor de HR se presentan las variaciones más notables en cuanto a estabilización, mientras que por su parte las HR restantes muestran similitudes entre

ellas, tal es el caso de los valores 79.18% y 19.80% que aunque poseen una diferencia en las primeras 200 horas, llegada esta hora muestran un comportamiento cercano y estable; así mismo sucede con los valores 0% y 5.60% que presentan variaciones entre sí muy poco significativas destacando de esta forma el porcentaje de 0% dada su gran estabilidad.

4.2 Isotermas de desorción

Una vez obtenidas nuestras cinéticas de desorción se prosiguió con la construcción de las respectivas isotermas de desorción que nos estarían representando de forma visual la transferencia de masa que existe en el secado de nuestros diferentes tipos de madera.

La construcción de dichas isotermas, se llevó a cabo por medio de dos modelos los cuales son el Modelo Brunauer – Emmett – Teller (BET) y el Modelo Guggenheim – Anderson – De Boer (GAB).

4.2.1 Isotermas BET

A través de este modelo se relacionó a temperatura constante el contenido de humedad de equilibrio (CHE) con la actividad de agua (a_w) presentada en nuestra madera en un intervalo de tiempo. Dicha modelo, parte de la *Ecuación 9*:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{a_w G}{(1-a_w)(1-a_w+a_w G)} \quad (9)$$

Donde:

m : contenido de humedad $\left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right]$

m_0 : contenido de humedad en monocapa $\left[\frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right]$

a_w : actividad de agua [adimensional]

G : constante relacionada con la energía de adsorción [adimensional]

Es como de este modo y partiendo de la *Ecuación 9*, se comenzó con la construcción de isothermas buscadas, para ello se comenzó calculando los valores en la monocapa llevando de esta manera a que nuestra *Ecuación 9* fuera linealizada dando paso a la *Ecuación 10*:

$$\frac{a_w}{(1-a_w)m} = a + ba_w \quad (10)$$

Así mismo mediante una regresión lineal se establecieron nuestros coeficientes, obteniendo las siguientes relaciones:

$$a = \frac{1}{m_0 G}$$

$$b = \frac{(G - 1)}{m_0 G}$$

Al igual que el coeficiente de determinación (R^2) que nos puede explicar la variabilidad de un factor ocasionada por su la correlación con otro factor. De modo que a través de dichos coeficientes se pudo generar una relación para el valor del contenido de humedad en la monocapa y para nuestra constante G :

$$m_0 = \frac{1}{(a + b)}$$

$$G = \frac{a}{m_0}$$

Una vez teniendo todas nuestras relaciones se comenzaron a trabajar los datos ya previamente calculados a ambas temperaturas.

Isotermas @ 35 °C.

Para la construcción de nuestras isotermas se consideraron los tres tipos de madera con los seis porcentajes diferentes de HR @ 35 °C, en la *Tabla 26* se concentran los datos de madera de encino a las ya mencionadas condiciones recordando en todo momento que a_w está referida a la HR/100 y que los datos de $m_{\text{experimental}}$ se refieren a los datos de CHE recopilados ya en la *Tabla 24*.

Tabla 26 Datos de madera de encino @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$
35 °C	0	0.100873172	0
	0.0673	0.185578998	0.388816121
	0.207	0.178258961	1.464353024
	0.4318	0.221020484	3.438340498
	0.7978	0.259302566	15.21619504
	0.9671	0.435720456	67.463293

Fuente: Elaborada por el autor

Datos con los cuales se construyó un primer gráfico que se muestra en la *Figura 26*:

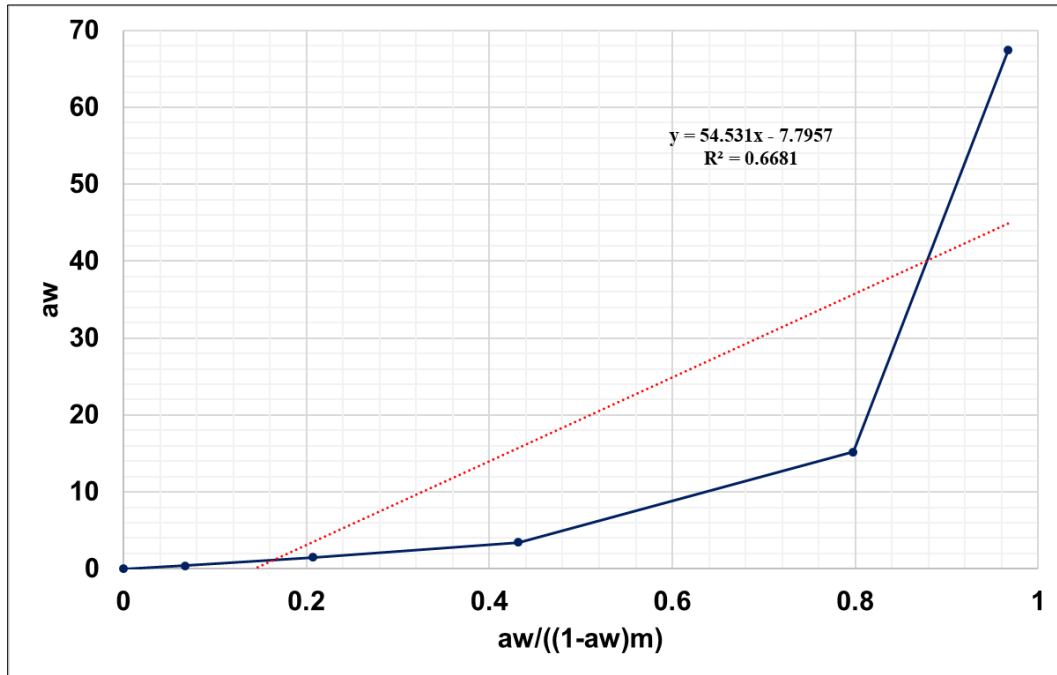


Figura 26 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de encino @ 35 °C

Es de esta manera que graficando a_w vs. $a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$, siendo el denominador el término “y” en la ecuación linealizada, por medio de una regresión lineal se obtuvieron valores de -7.7957 y 54.531 para a y b respectivamente; así mismo, sustituyendo dichos valores en las relaciones para m_0 y G se tuvo un valor de $0.021397102 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ para m_0 y -5.99501007 para G , los cuales fueron utilizados en el cálculo de m_{simulada} por medio de la siguiente correlación:

$$m_{\text{simulada}} = \frac{m_0 a_w G}{(1 - a_w)(1 - a_w + a_w G)}$$

Generando los datos mostrados en la *Tabla 27*, mismos que se utilizan posteriormente en la graficación de la isoterma simulada de desorción para nuestra madera a las condiciones bajo las que se trabajó (*Figura 27*).

Tabla 27 Datos finales de madera de encino @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$	m_{simulada}
35 °C	0	0.100873172	0	0
	0.0673	0.185578998	0.388816121	-0.017489151
	0.207	0.178258961	1.464353024	0.074747373
	0.4318	0.221020484	3.438340498	0.048247985
	0.7978	0.259302566	15.21619504	0.110492701
	0.9671	0.435720456	67.463293	0.654079488

Fuente: Elaborada por el autor

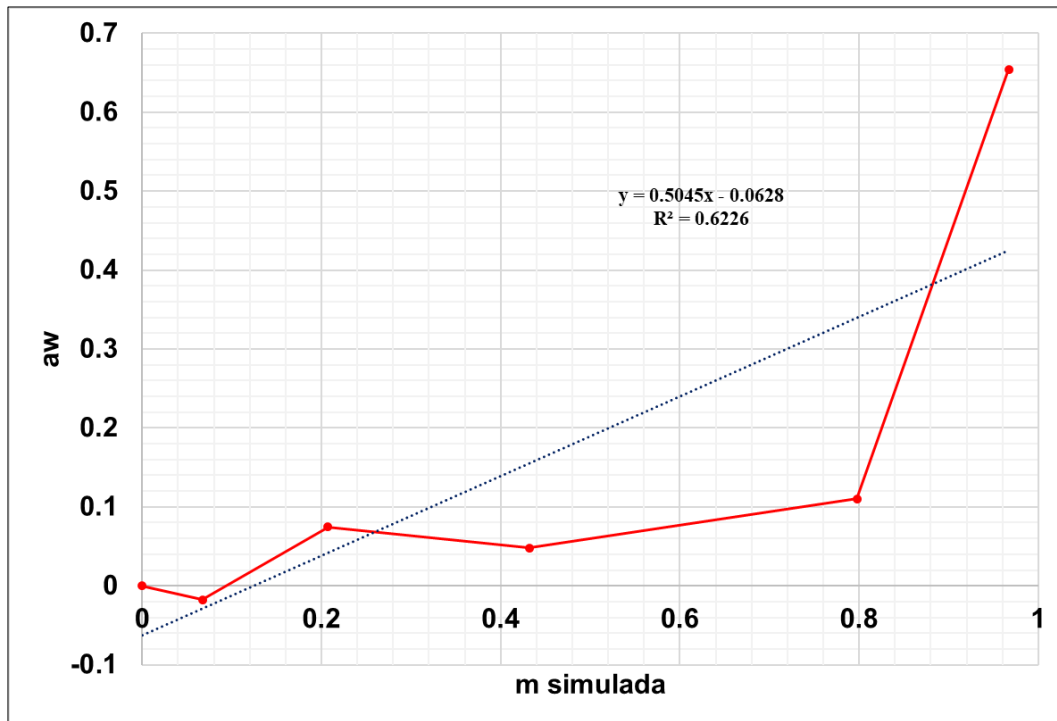


Figura 27 Isotherma de desorción simulada para madera de encino @ 35 °C

La construcción de nuestra isoterma simulada nos da oportunidad de una comparativa entre ambas isotermas elaboradas que se puede apreciar de forma gráfica en la *Figura 28*, en este gráfico se colocaron dos series, la Isotherma simulada (a_w vs. $m_{simulada}$) y la Isotherma experimental (a_w vs. $m_{experimental}$).

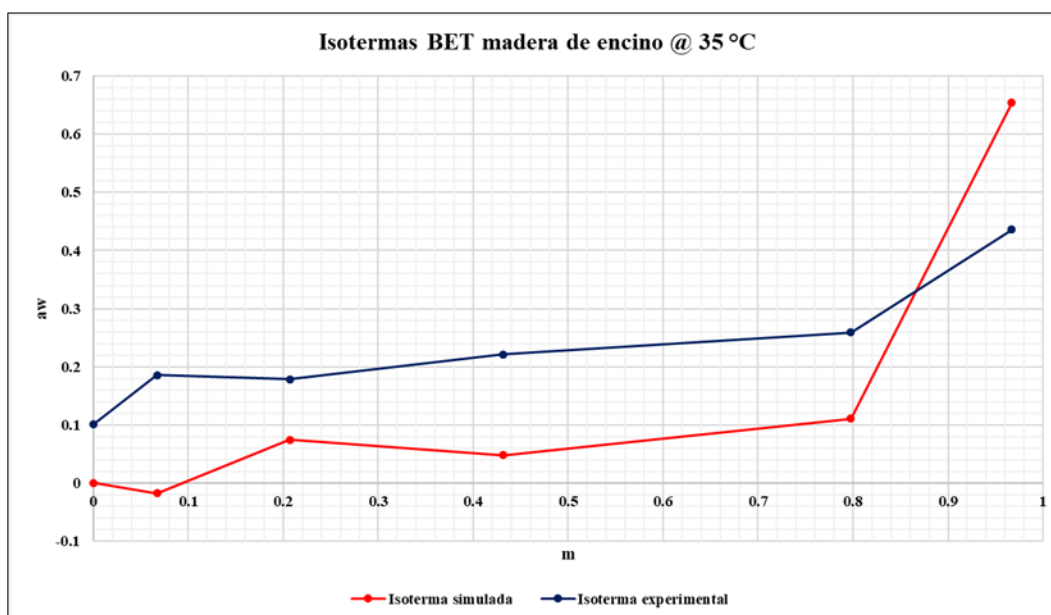


Figura 28 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de encino @ 35 °C

En dicha comparativa se puede apreciar de forma inmediata la ligera similitud que existe entre la forma que poseen, sin embargo, si se analiza punto por punto ya que cada uno de estos corresponde a las distintas condiciones de humedad relativa a las que se trabajó se cuenta con diferencias entre los valores experimentales y simulados los cuales se concentran a continuación en la *Tabla 28*.

Tabla 28 Comparativa Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de encino @ 35

aw	m_{experimental}	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.100873172	0	0.10087317
0.0673	0.185578998	-0.017489151	0.20306815

0.207	0.178258961	0.074747373	0.10351159
0.4318	0.221020484	0.048247985	0.1727725
0.7978	0.259302566	0.110492701	0.14880987
0.9671	0.435720456	0.654079488	0.21835903

Fuente: Elaborada por el autor

Una vez comprendida la dinámica en cuanto a elaboración de isothermas se procedió a solamente colocar los gráficos obtenidos, así como los valores requeridos para las mismas.

Tabla 29 Datos de madera de pino @ 35 °C

Temperatura	a_w	m_{experimental}	a_w /[(1- a_w) m_{experimental}]
35 °C	0	0.209259014	0
	0.0673	0.25038782	0.28817738
	0.207	0.243373074	1.072567492
	0.4318	0.306929539	2.475954852
	0.7978	0.346084265	11.40068711
	0.9671	0.490142371	59.97264981

Fuente: Elaborada por el autor

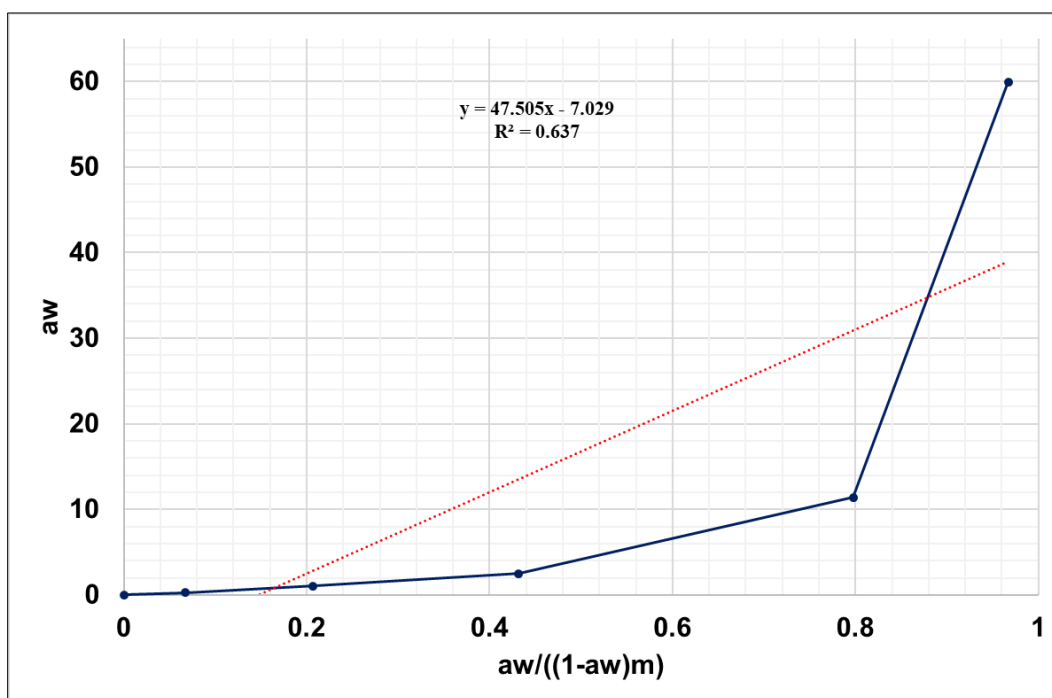


Figura 29 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de pino @ 35 °C

Dicha isoterma brindó valores de -7.029 y 47.505 para a y b , que permitieron obtener como valores de m_0 y G a $0.024705999 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ y -5.758429364 respectivamente, para la obtención de los datos de la *Tabla 30*.

Tabla 30 Datos finales de madera de pino @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$	m_{simulada}
	0	0.209259014	0	0
35 °C	0.0673	0.25038782	0.28817738	-0.018830307
	0.207	0.243373074	1.072567492	0.093075696

0.4318	0.306929539	2.475954852	0.056360346
0.7978	0.346084265	11.40068711	0.127811335
0.9671	0.490142371	59.97264981	0.755404934

Fuente: Elaborada por el autor

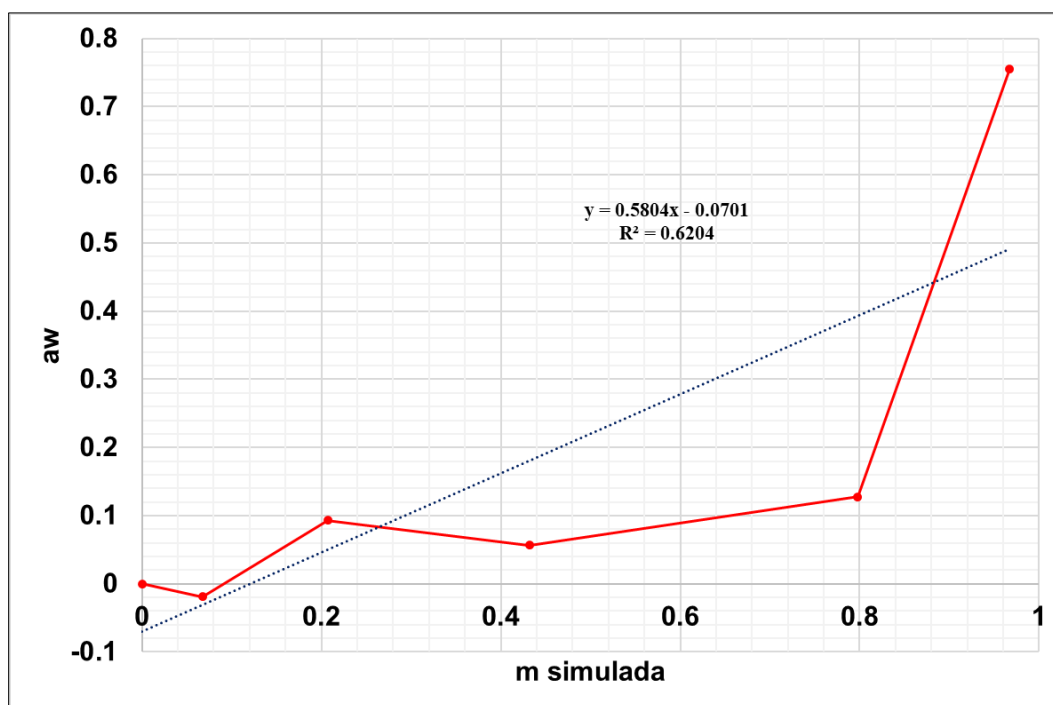


Figura 30 Isotherma de desorción simulada para madera de pino @ 35 °C

La comparativa de ambas isothermas se muestra en la *Figura 31*.

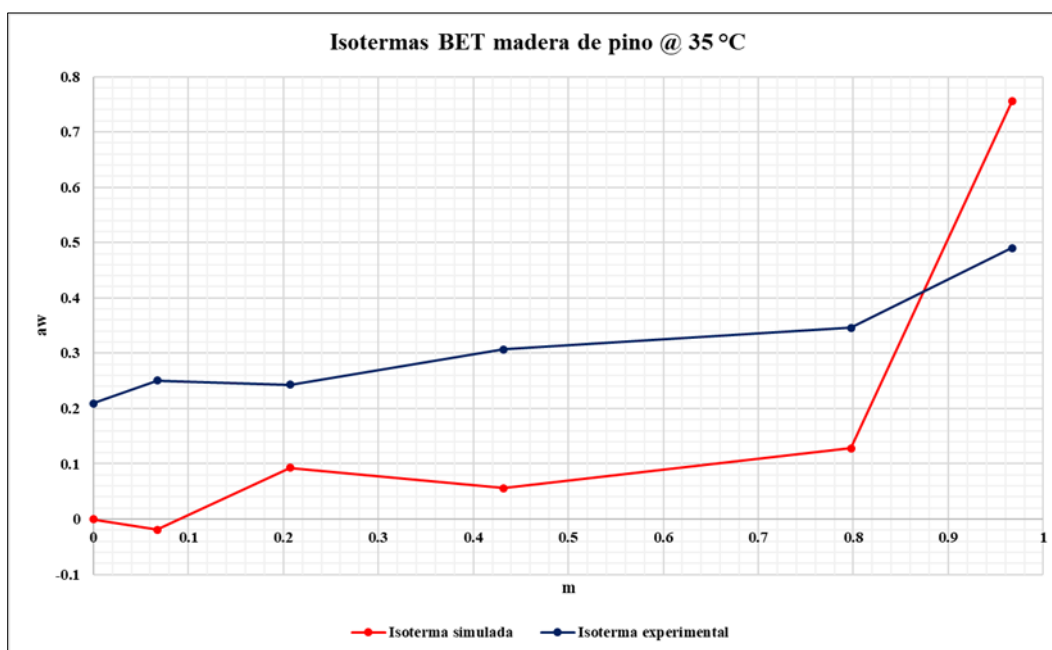


Figura 31 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de pino @ 35 °C

De dicha gráfica y de sus respectivos datos se pudo realizar la concentración de los mismos en la *Tabla 31* que se aprecia en seguida.

Tabla 31 Comparativa Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de pino @ 35

a_w	$m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.209259014	0	0.20925901
0.0673	0.25038782	-0.018830307	0.26921813
0.207	0.243373074	0.093075696	0.15029738
0.4318	0.306929539	0.056360346	0.25056919

0.7978	0.346084265	0.127811335	0.21827293
0.9671	0.490142371	0.755404934	0.26526256

Fuente: Elaborada por el autor

Por último, se tiene la madera de cedro que presentó las siguientes isothermas de desorción:

Tabla 32 Datos de madera de cedro @ 35 °C

Temperatura	a_w	m_{experimental}	a_w /[(1- a_w) m_{experimental}]
35 °C	0	0.302378023	0
	0.0673	0.298834921	0.241458079
	0.207	0.294392231	0.886687963
	0.4318	0.425120604	1.787595508
	0.7978	0.49094989	8.036662191
	0.9671	0.633582697	46.39510665

Fuente: Elaborada por el autor

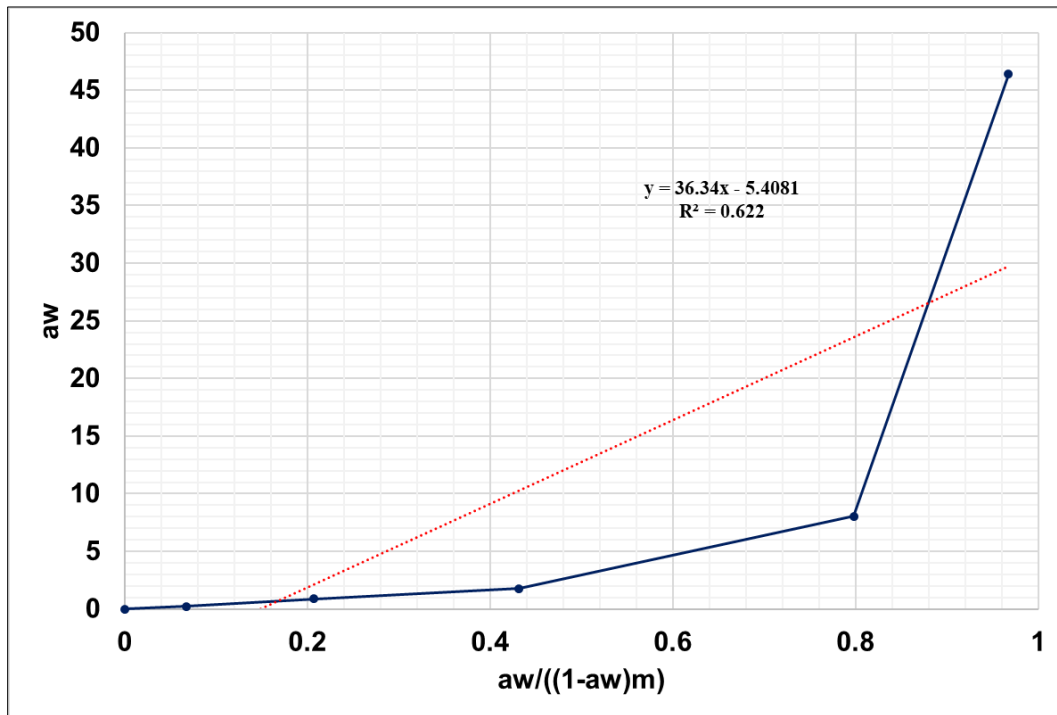


Figura 32 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de cedro @ 35 °C

Es de este modo que se recopilieron datos para a y b con valores de -5.4081 y 36.34 respectivamente, los cuales más tarde generaron valores de $0.032329084 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ para m_0 y -5.719550304 para G .

Tabla 33 Datos finales de madera de cedro @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$	m_{simulada}
	0	0.302378023	0	0
35 °C	0.0673	0.298834921	0.241458079	-0.024357166
	0.207	0.294392231	0.886687963	0.123462383

0.4318	0.425120604	1.787595508	0.073899236
0.7978	0.49094989	8.036662191	0.167300138
0.9671	0.633582697	46.39510665	0.98852658

Fuente: Elaborada por el autor

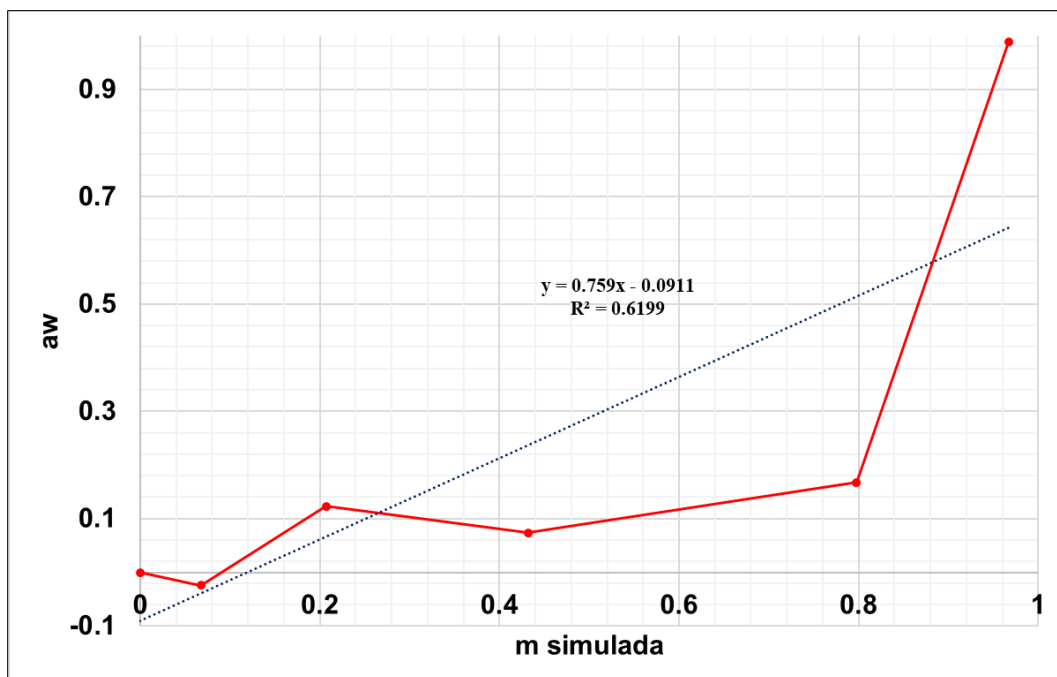


Figura 33 Isoterma de desorción simulada para madera de cedro @ 35 °C

La comparativa de ambas isotermas se muestra en la *Figura 34*:

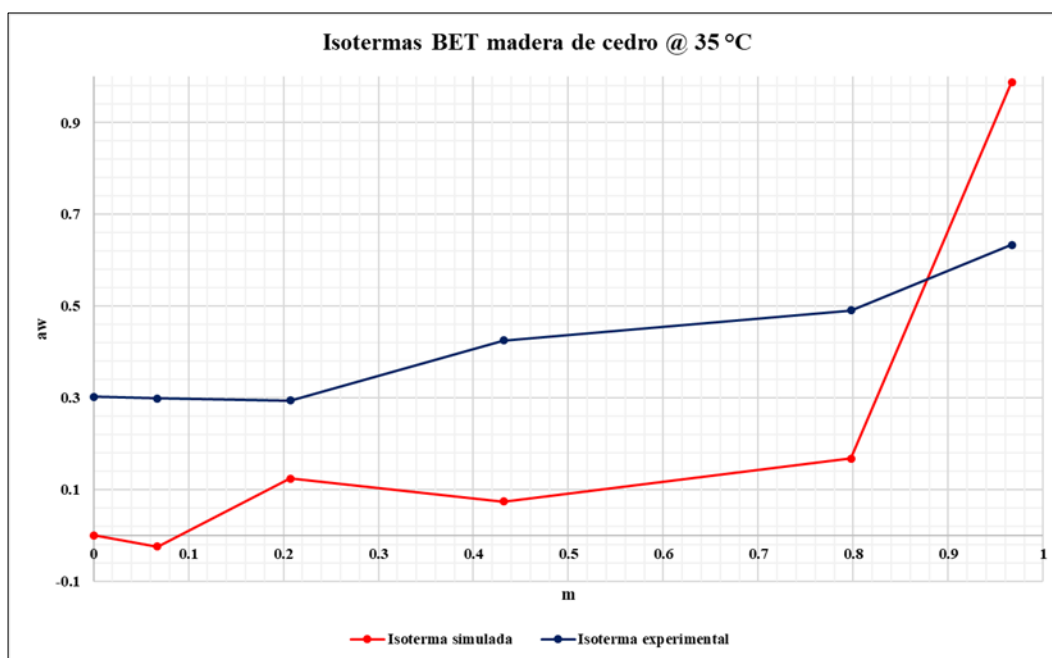


Figura 34 Isoterma de BET experimental vs. Isoterma de BET simulada para madera de cedro @ 35 °C

Misma de la cual se obtuvo la *Tabla 34*

Tabla 34 Comparativa Isoterma de BET experimental vs. Isoterma de BET simulada para madera de cedro @ 35

a_w	$m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.302378023	0	0.30237802
0.0673	0.298834921	-0.024357166	0.32319209
0.207	0.294392231	0.123462383	0.17092985
0.4318	0.425120604	0.073899236	0.35122137
0.7978	0.49094989	0.167300138	0.32364975

0.9671	0.633582697	0.98852658	0.35494388
--------	-------------	------------	------------

Fuente: Elaborada por el autor

Isotermas @ 45 °C.

Al igual que con la temperatura anterior se llevó a cabo la misma metodología para poder obtener los siguientes datos e isotermas @ 45 °C en distintos tipos de madera que se estarán presentando a continuación, cabe mencionar que los datos de $m_{\text{experimental}}$ se refieren a los datos de CHE encontrados en la *Tabla 35*.

Tabla 35 Datos de madera de encino @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$
45 °C	0	0.054529837	0
	0.056	0.180083861	0.329413384
	0.198	0.18368804	1.344033029
	0.4318	0.417652203	1.819561052
	0.7918	0.203439769	18.69385712
	0.9612	0.299941961	82.59329823

Fuente: Elaborada por el autor

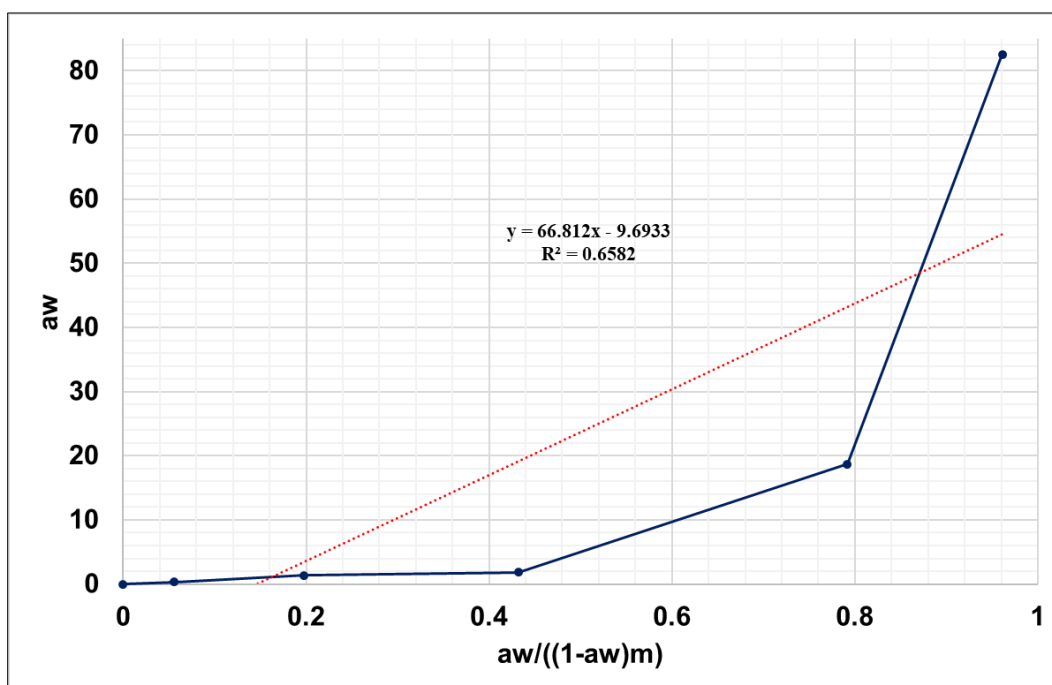


Figura 35 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de encino @ 45 °C

De este modo a partir de la *Figura 36* se obtuvieron valores para a y b de -9.6933 y 66.812 respectivamente, que al ser sustituidos en las debidas correlaciones generaron los siguientes datos para $m_0 = 0.017507401 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ y $G = -5.892595917$.

Tabla 36 Datos finales de madera de encino @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$	m_{simulada}
	0	0.054529837	0	0
45 °C	0.056	0.180083861	0.329413384	-0.009967028
	0.198	0.18368804	1.344033029	0.069830143

0.4318	0.417652203	1.819561052	0.039671062
0.7918	0.203439769	18.69385712	0.08801692
0.9612	0.299941961	82.59329823	0.454334018

Fuente: Elaborada por el autor

Los datos finales que se agregaron fueron de la misma manera utilizados en la graficación de la isoterma simulada que se observa en la *Figura 36*.

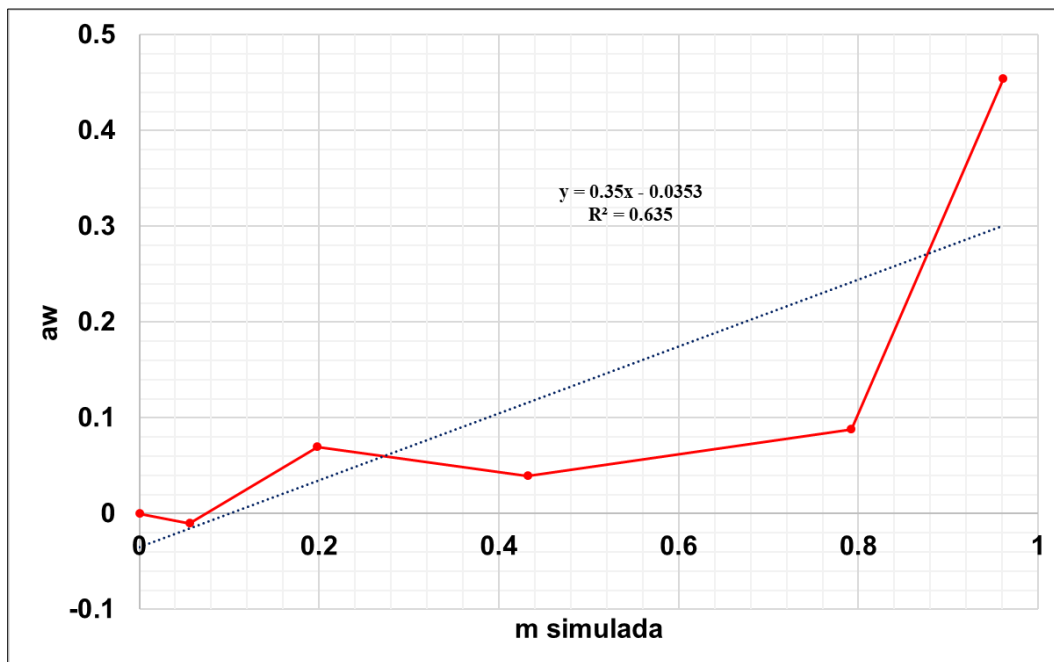


Figura 36 Isotherma de desorción simulada para madera de encino @ 45 °C

Una vez teniendo ambas isotermas de desorción se continuó con la comparativa de las mismas la cual se observa en la *Figura 37*.

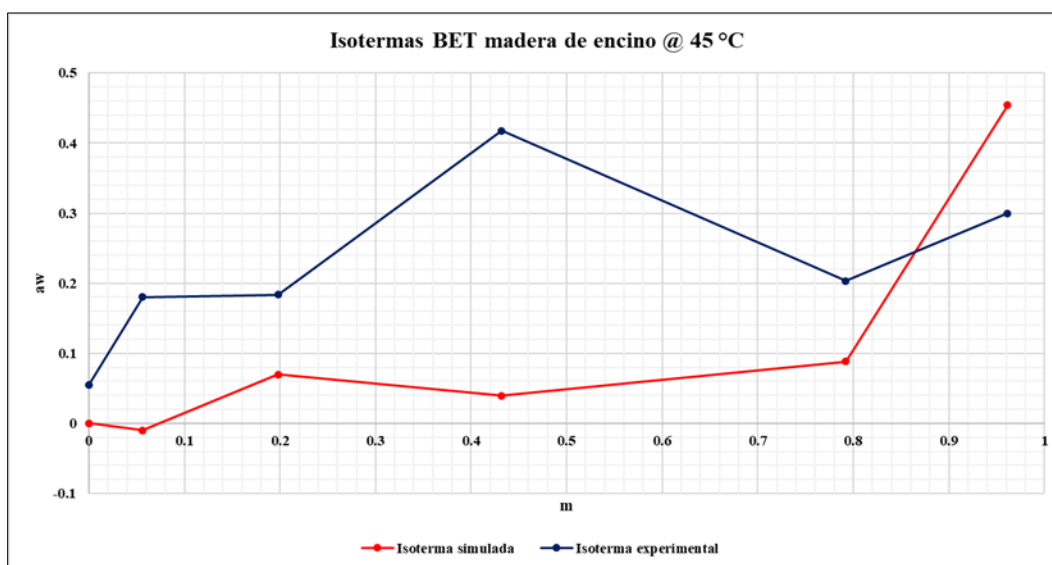


Figura 37 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de encino @ 45 °C

Y de la cual parte la comparativa que se concentra en la *Tabla 37*.

Tabla 37 Comparativa Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de encino @ 45

aw	m_{experimental}	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.054529837	0	0.0545298
0.056	0.180083861	-0.009967028	0.1900509
0.198	0.18368804	0.069830143	0.1138579
0.4318	0.417652203	0.039671062	0.3779811
0.7918	0.203439769	0.08801692	0.1154228
0.9612	0.299941961	0.454334018	0.154392

Fuente: Elaborada por el autor

Para la madera de pino se lograron los siguientes gráficos por medio de la obtención de los datos también mostrados.

Tabla 38 Datos de madera de pino @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$
45 °C	0	0.226791417	0
	0.056	0.231745824	0.255978869
	0.198	0.31116118	0.793424143
	0.4318	0.998605693	0.761004756
	0.7918	0.396341989	9.595435449
	0.9612	0.465475645	53.22125044

Fuente: Elaborada por el autor

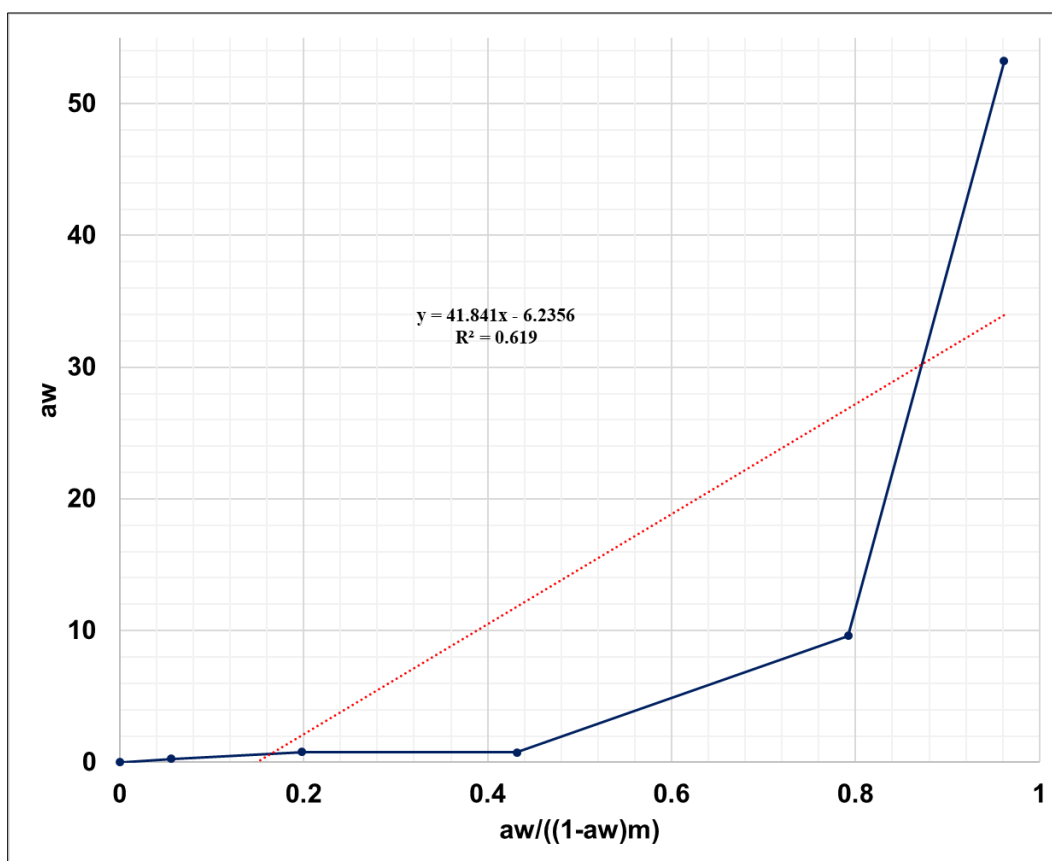


Figura 38 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de pino @ 45 °C

Por medio de la isoterma experimental obtenida se recopilaron los valores para $a = -6.2356$ y $b = 41.841$ dando a su vez resultados para m_0 y G de $0.028085627 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ y 5.710019886 respectivamente, los cuales nos llevaron al cálculo de m_{simulada} mostrados en la *Tabla 39*.

Tabla 39 Datos finales de madera de pino @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$	m_{simulada}
45 °C	0	0.0226791417	0	0

0.056	0.231745824	0.255978869	-0.01524007
0.198	0.31116118	0.793424143	0.120494228
0.4318	0.998605693	0.761004756	0.064231392
0.7918	0.396341989	9.595435449	0.14140921
0.9612	0.465475645	53.22125044	0.729010015

Fuente: Elaborada por el autor

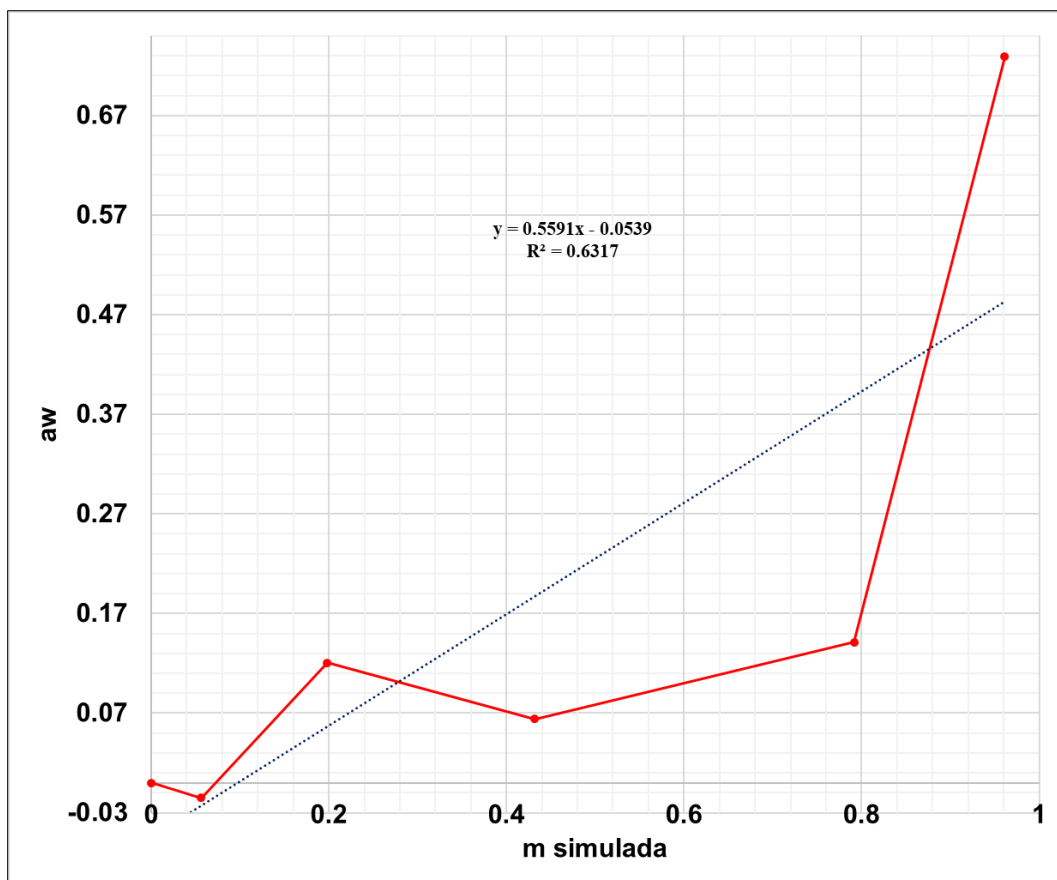


Figura 39 Isotherma de desorción simulada para madera de pino @ 45 °C

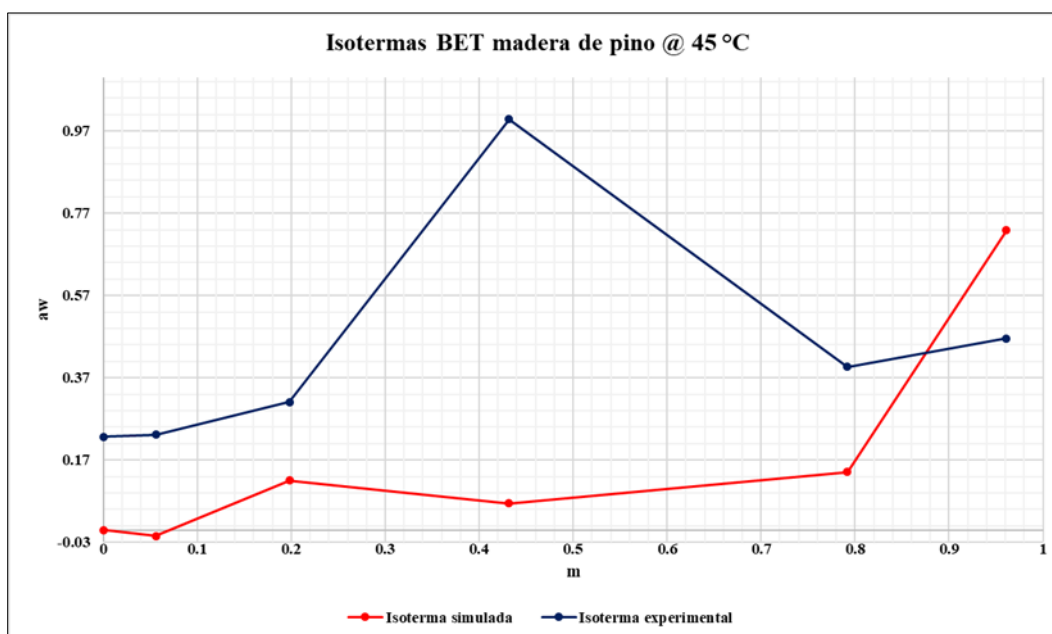


Figura 40 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de pino @ 45 °C

La comparativa numérica de dichas isotermas se ve reflejada en la *Tabla 40* mostrada a continuación.

Tabla 40 Comparativa Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de pino @ 45

a_w	$m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.226791417	0	0.2267914
0.056	0.231745824	-0.01524007	0.2469859
0.198	0.31116118	0.120494228	0.190667
0.4318	0.998605693	0.064231392	0.9343743

0.7918	0.396341989	0.14140921	0.2549328
0.9612	0.465475645	0.729010015	0.263534

Fuente: Elaborada por el autor

Por último, se tienen los valores y gráficos generados por la madera de cedro que se concentran a en la *Tabla 41*.

Tabla 41 Datos de madera de cedro @ 45 °C

Temperatura	a_w	m_{experimental}	a_w /[(1- a_w) m_{experimental}]
45 °C	0	0.16692339	0
	0.056	0.177947331	0.333368494
	0.198	0.364325702	0.677643087
	0.4318	1.116398022	0.680710344
	0.7918	0.333181948	11.41440583
	0.9612	0.44537339	55.62343061

Fuente: Elaborada por el autor

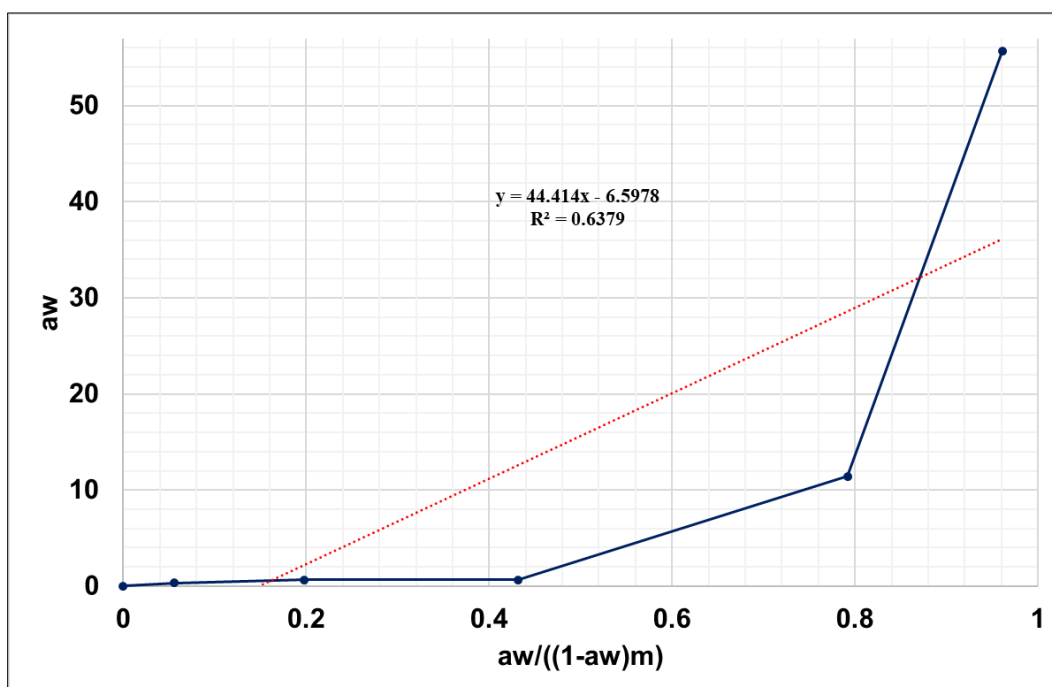


Figura 41 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma BET en madera de cedro @ 45 °C

Es de esta manera que a partir de la Figura 41 se obtuvieron datos de -6.5978 y 44.414 para a y b teniendo a su vez valores para m_0 y G de $0.026443693 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ y 5.731637819 respectivamente, los cuales nos llevaron al cálculo de m_{simulada} mostrados en la *Tabla 42*.

Tabla 42 Datos finales de madera de cedro @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / [(1 - a_w) m_{\text{experimental}}]$	m_{simulada}
	0	0.16692339	0	0
45 °C	0.056	0.177947331	0.333368494	-0.014431422
	0.198	0.364325702	0.677643087	0.112415054

0.4318	1.116398022	0.680710344	0.060408084
0.7918	0.333181948	11.41440583	0.133117948
0.9612	0.44537339	55.62343061	0.686372406

Fuente: Elaborada por el autor

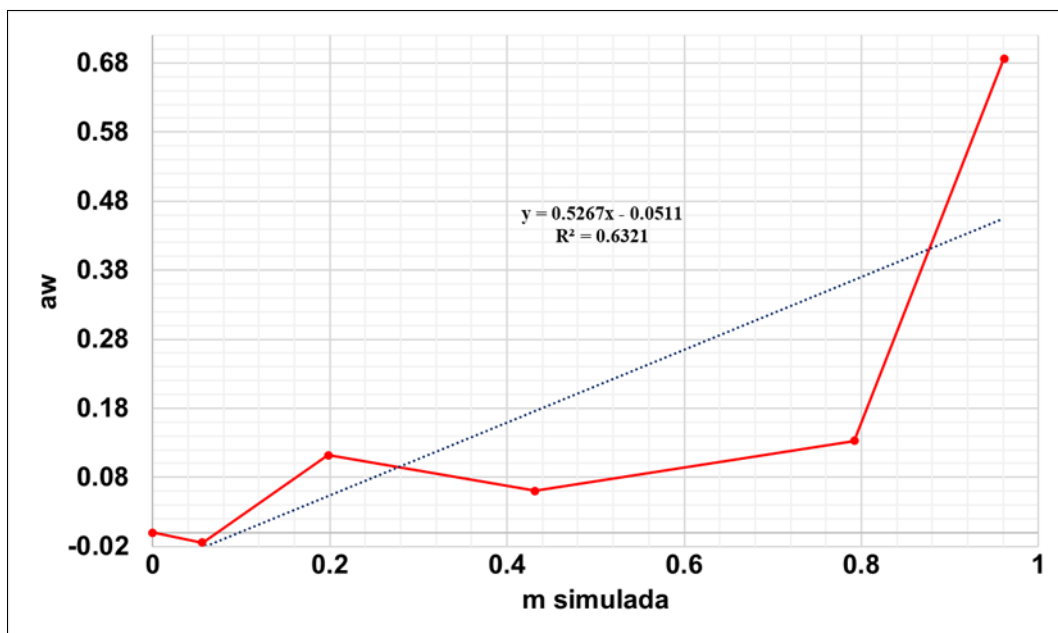


Figura 42 Isoterma de desorción simulada para madera de cedro @ 45 °C

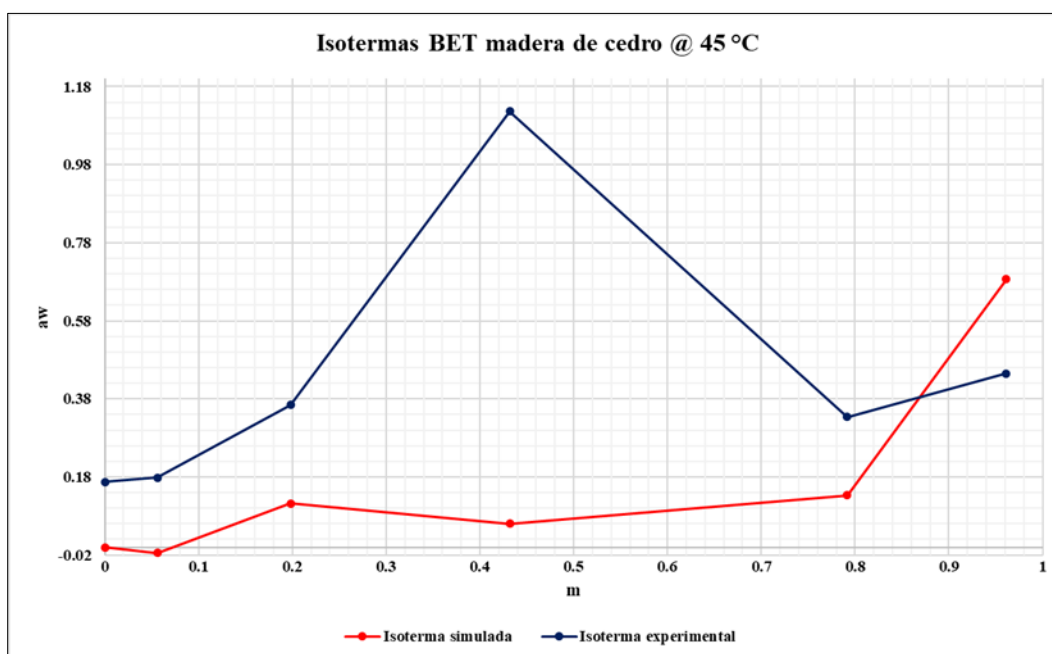


Figura 43 Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de cedro @ 45 °C

Gráfico del cual se recopilaron datos en la *Tabla 43* para su posterior análisis

Tabla 43 Comparativa Isotherma de BET experimental vs. Isotherma de BET simulada para madera de cedro @ 45

a_w	$m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.16692339	0	0.1669234
0.056	0.177947331	-0.014431422	0.1923788
0.198	0.364325702	0.112415054	0.2519106
0.4318	1.116398022	0.060408084	1.0559899
0.7918	0.333181948	0.133117948	0.200064

0.9612	0.44537339	0.686372406	0.240999
--------	------------	-------------	----------

Fuente: Elaborada por el autor

4.2.2 Isotermas GAB

Nuestros datos no solamente se trabajaron bajo el modelo BET, sino también se decidieron trabajar bajo el modelo GAB esto dado a que, aunque ambos modelos están basados en los mismos principios de monocapa, el modelo GAB añade un grado de libertad (k) lo que le atribuye mayor versatilidad en comparación del modelo BET que asume que el fenómeno de desorción solo se lleva a cabo en las distintas multicapas sin interacciones laterales a diferencia del modelo GAB que con la incorporación del parámetro ya antes mencionado supone que las moléculas en multicapas presentan una interacción con el adsorbente similar a la que se tiene en la monocapa.

Dicho modelo tiene como base la *Ecuación 11*:

$$\frac{m}{m_0} = \frac{a_w G k}{(1 - a_w k)(1 - a_w k + a_w G k)} \quad (11)$$

Ecuación que al ser linealizada da como resultado una ecuación cuadrática (*Ecuación 12*)

$$\frac{a_w}{m} = A a_w^2 + B a_w + C \quad (12)$$

Misma ecuación cuadrática que se trabajó bajo el método de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados para obtener los siguientes coeficientes de regresión:

$$A = \left(\frac{k}{m_0}\right) \left(\frac{1}{G} - 1\right)$$

$$B = \left(\frac{1}{m_0}\right) \left(1 - \frac{2}{G}\right)$$

$$C = \frac{1}{m_0 G k}$$

Con base en estos coeficientes se obtuvo una relación para el valor de m_0 que posteriormente fue empleado en las relaciones para determinar G y k :

$$m_0 = \frac{1}{(B^2 - 4AC)^{0.5}}$$

$$G = -\frac{2}{m_0 B - 1}$$

$$k = \frac{1}{m_0 G C}$$

Teniendo ya bien definidas las relaciones a trabajar, se comenzó con los cálculos respectivos a cada madera y a sus condiciones específicas.

Isotermas @ 35 °C.

En cuanto a la construcción de isotermas del modelo GAB de igual manera se tomaron en cuenta los tres tipos de madera con los seis porcentajes diferentes de HR @ 35 °C, en la *Tabla 44* se presentan los datos de madera de encino a las condiciones ya considerando que a_w está

referida a la HR/100 y que los datos de $m_{\text{experimental}}$ se refieren a los datos de CHE recopilados ya en la *Tabla 25*.

Tabla 44 Datos de madera de encino @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$
35 °C	0	0.100873172	0
	0.0673	0.185578998	0.362648796
	0.207	0.178258961	1.161231948
	0.4318	0.221020484	1.953665071
	0.7978	0.259302566	3.076714637
	0.9671	0.435720456	2.21954234

Fuente: Elaborada por el autor

Datos con los cuales se construyó un primer gráfico que se muestran en la *Figura 44*:

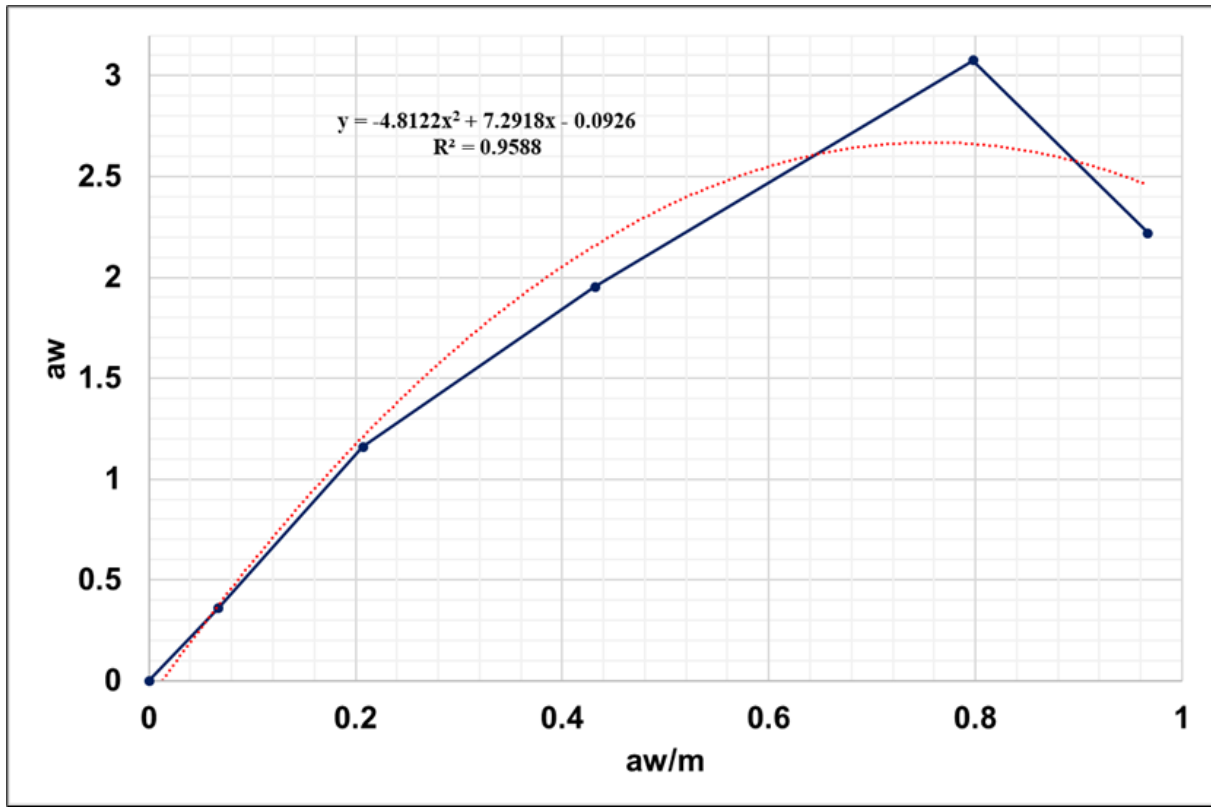


Figura 44 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de encino @ 35 °C

De este modo, graficando a_w vs. $a_w / m_{\text{experimental}}$, siendo el denominador el término “y” en la ecuación linealizada y haciendo uso de una regresión lineal se obtuvieron valores de -4.8122, 7.2918 y -0.0926 para a , b y c respectivamente, una vez contando con dichos valores se procedió a sustituir los valores en las relaciones ya formuladas para m_0 , G y k ; dando como resultado: $m_0 = 0.139498497 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$, $G = -116.3119143$ y $k = 0.665572363$ valores que fueron usados en el cálculo de m_{simulada} apoyados de la siguiente correlación:

$$m_{\text{simulada}} = \frac{m_0 a_w G k}{(1 - a_w k)(1 - a_w k + a_w G k)}$$

Una vez llevada a cabo la sustitución se concentraron los datos obtenidos en la *Tabla 45*, mismos que se utilizan posteriormente en la graficación de la isoterma simulada de desorción (*Figura 45*).

Tabla 45 Datos finales de madera de encino @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}
35 °C	0	0.100873172	0	0
	0.0673	0.185578998	0.362648796	0.178826567
	0.207	0.178258961	1.161231948	0.170988936
	0.4318	0.221020484	1.953665071	0.200022366
	0.7978	0.259302566	3.076714637	0.299710092
	0.9671	0.435720456	2.21954234	0.393364538

Fuente: Elaborada por el autor

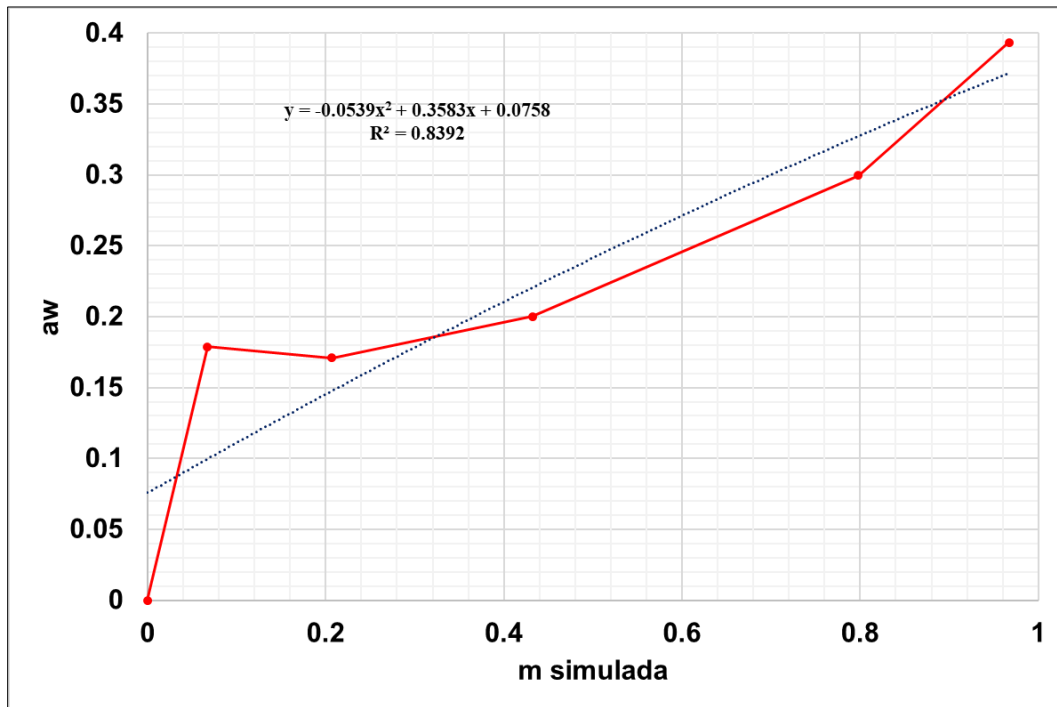


Figura 45 Isotherma de desorción simulada para madera de encino @ 35 °C

Una vez generada nuestra isoterma simulada se comienza con la construcción de un gráfico que nos permita comparar ambas isotermas elaboradas, la Isotherma simulada (a_w vs. m_{simulada}) y la Isotherma experimental (a_w vs. $m_{\text{experimental}}$).

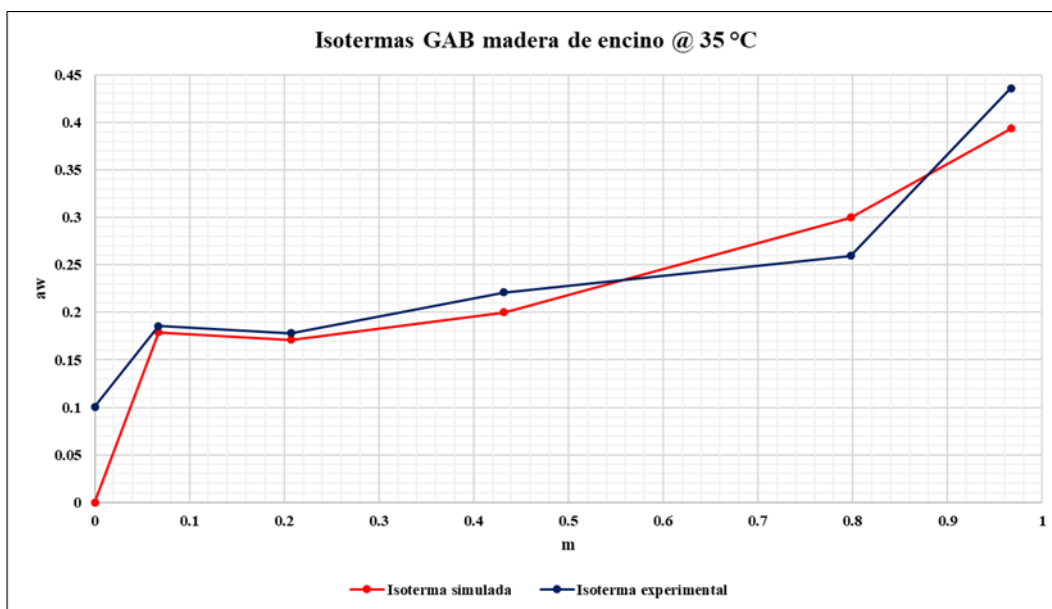


Figura 46 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de encino @ 35 °C

Tabla 46 Comparativa Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de encino @ 35

a_w	$m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.100873172	0	0.1008732
0.0673	0.185578998	0.178826567	0.0067524
0.207	0.178258961	0.170988936	0.00727
0.4318	0.221020484	0.200022366	0.0209981
0.7978	0.259302566	0.299710092	0.040408
0.9671	0.435720456	0.393364538	0.0423559

Fuente: Elaborada por el autor

Una vez comprendida la dinámica en cuanto a elaboración de isotermas se procede a solamente colocar los gráficos obtenidos, así como los valores requeridos para las mismas.

Tabla 47 Datos de madera de pino @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$
35 °C	0	0.209259014	0
	0.0673	0.25038782	0.268783042
	0.207	0.243373074	0.850546021
	0.4318	0.306929539	1.406837547
	0.7978	0.346084265	2.305218934
	0.9671	0.490142371	1.973100179

Fuente: Elaborada por el autor

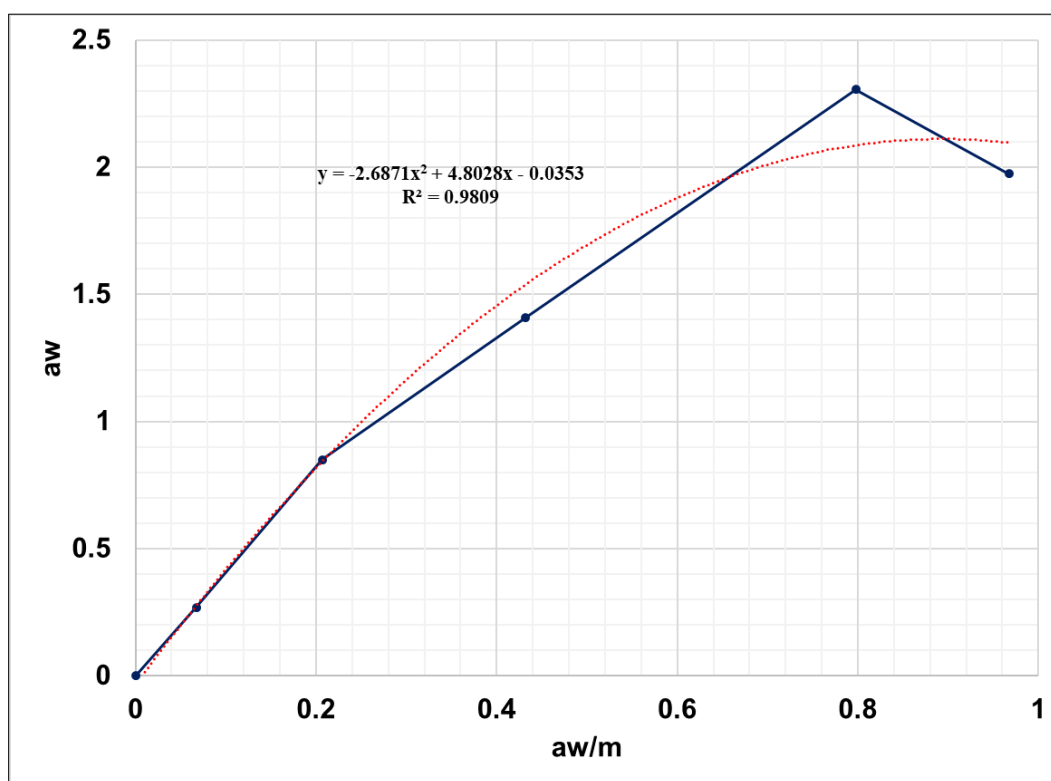


Figura 47 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de pino @ 35 °C

De la *Figura 47* se obtuvieron los siguientes valores $a = -2.6871$, $b = 4.8028$ y $c = -0.0353$ dando así mismo, valores para m_0 , G y k de $0.209945694 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$, -240.1773182 y 0.561805945 respectivamente.

Tabla 48 Datos finales de madera de pino @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}
35 °C	0	0.209259014	0	0
	0.0673	0.25038782	0.268783042	0.24405476
	0.207	0.243373074	0.850546021	0.245336226
	0.4318	0.306929539	1.406837547	0.280838969
	0.7978	0.346084265	2.305218934	0.38244063
	0.9671	0.490142371	1.973100179	0.461338728

Fuente: Elaborada por el autor

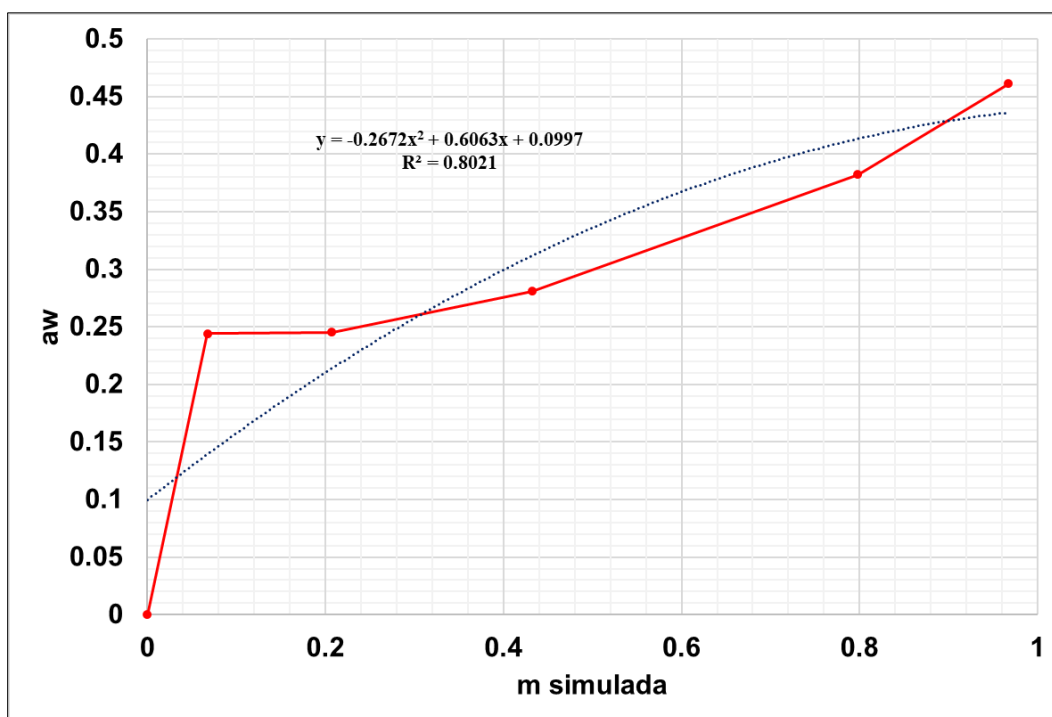


Figura 48 Isotherma de desorción simulada para madera de pino @ 35 °C

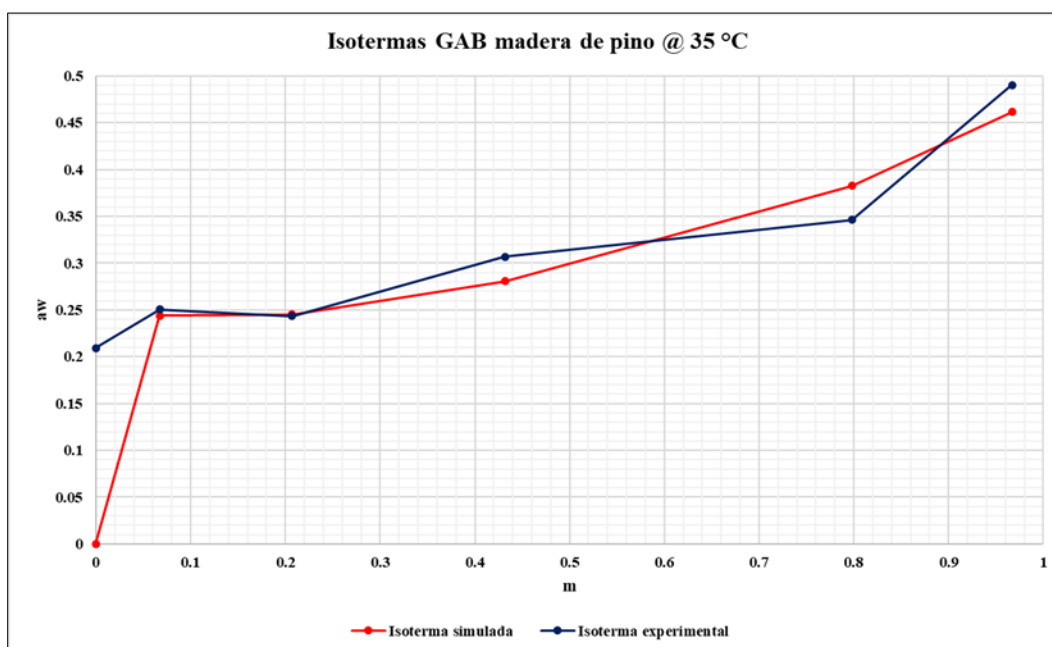


Figura 49 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de pino @ 35 °C

Tabla 49 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de pino @ 35

a_w	m_{experimental}	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.209259014	0	0.209259
0.0673	0.25038782	0.24405476	0.0063331
0.207	0.243373074	0.245336226	0.001963
0.4318	0.306929539	0.280838969	0.0260906
0.7978	0.346084265	0.38244063	0.036356
0.9671	0.490142371	0.461338728	0.0288036

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 50 Datos de madera de cedro @ 35 °C

Temperatura	a_w	m_{experimental}	a_w / m_{experimental}
35 °C	0	0.302378023	0
	0.0673	0.298834921	0.22520795
	0.207	0.294392231	0.703143555
	0.4318	0.425120604	1.015711767
	0.7978	0.49094989	1.625013095
	0.9671	0.633582697	1.526399009

Fuente: Elaborada por el autor

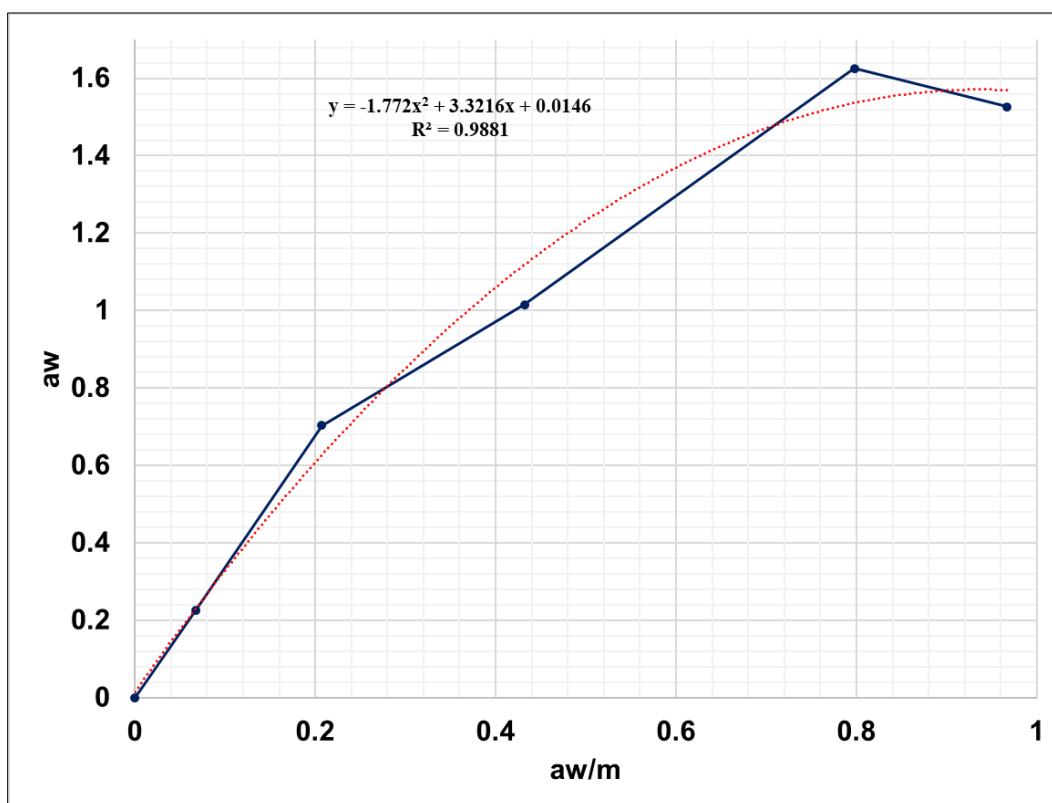


Figura 50 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de cedro @ 35 °C

A partir del gráfico mostrado en la *Figura 50* se obtuvieron valores de -1.772, 3.3216 y 0.0146 para a , b y c así mismo por medio de dichos valores y su respectiva sustitución se obtuvo que $m_0 = 0.299657683 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$, $G = 429.4574576$ y $k = 0.532232729$.

Tabla 51 Datos finales de madera de cedro @ 35 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}
35 °C	0	0.302378023	0	0
	0.0673	0.298834921	0.22520795	0.292458934

0.207	0.294392231	0.703143555	0.330542737
0.4318	0.425120604	1.015711767	0.386061281
0.7978	0.49094989	1.625013095	0.519157233
0.9671	0.633582697	1.526399009	0.616144661

Fuente: Elaborada por el autor

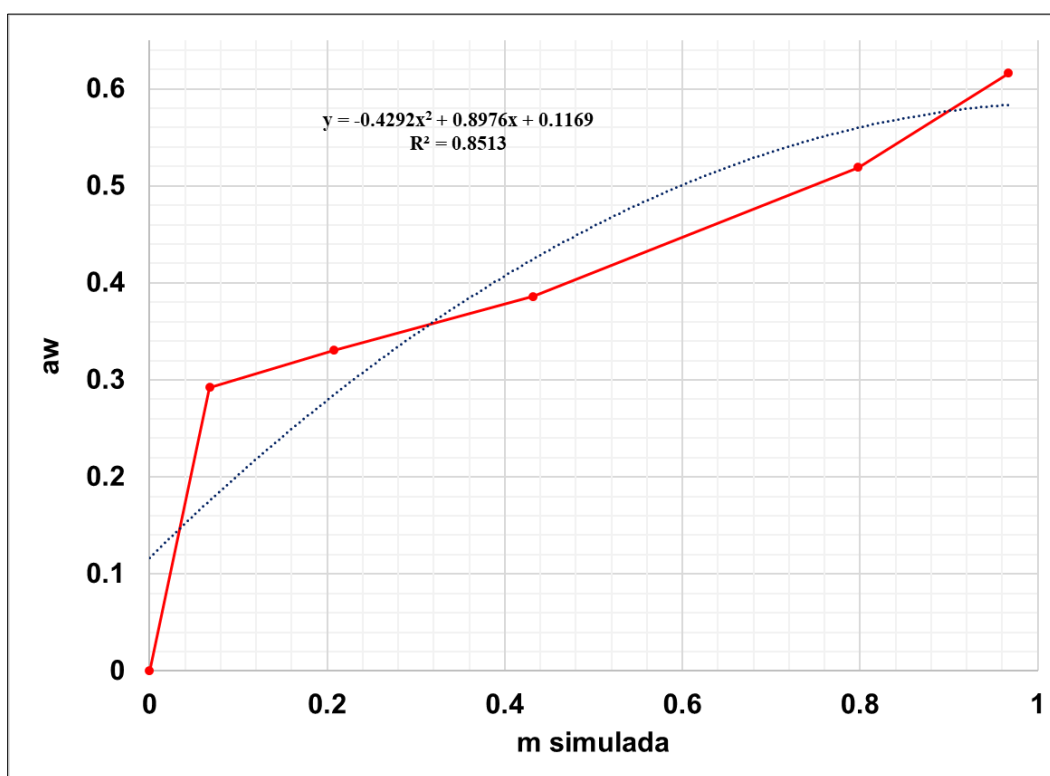


Figura 51 Isoterma de desorción simulada para madera de cedro @ 35 °C

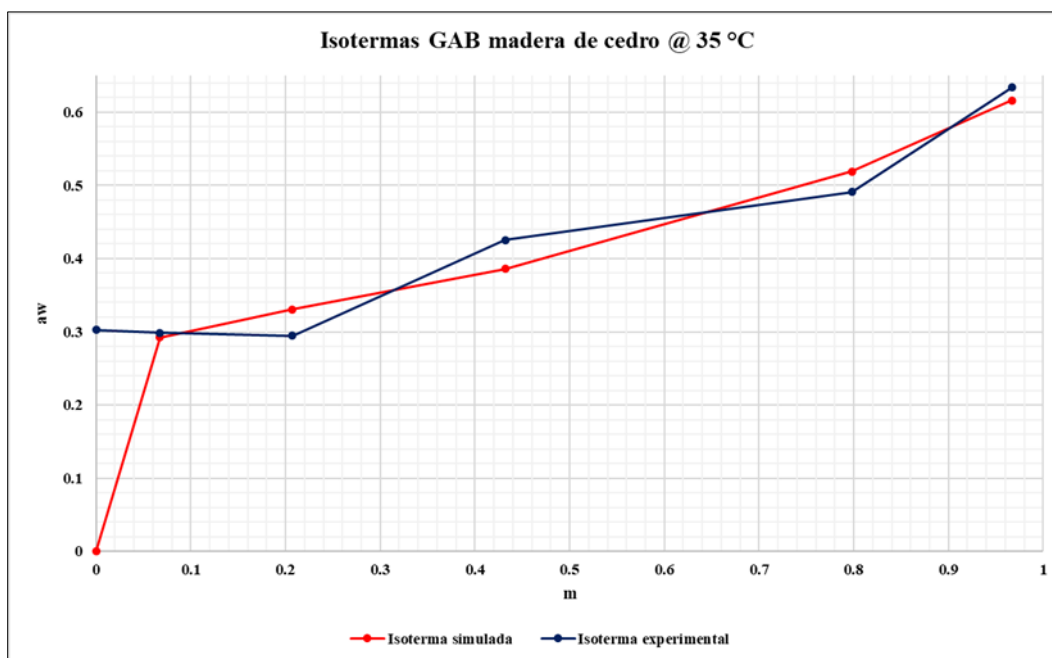


Figura 52 Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de cedro @ 35 °C

Tabla 52 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de cedro @ 35

a_w	$m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.302378023	0	0.302378
0.0673	0.298834921	0.292458934	0.006376
0.207	0.294392231	0.330542737	0.036151
0.4318	0.425120604	0.386061281	0.0390593
0.7978	0.49094989	0.519157233	0.028207
0.9671	0.633582697	0.616144661	0.017438

Fuente: Elaborada por el autor

Isotermas @ 45 °C.

Tabla 53 Datos de madera de encino @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$
45 °C	0	0.054529837	0
	0.056	0.180083861	0.310966234
	0.198	0.18368804	1.077914489
	0.4318	0.417652203	1.03387459
	0.7918	0.203439769	3.892061052
	0.9612	0.299941961	3.204619971

Fuente: Elaborada por el autor

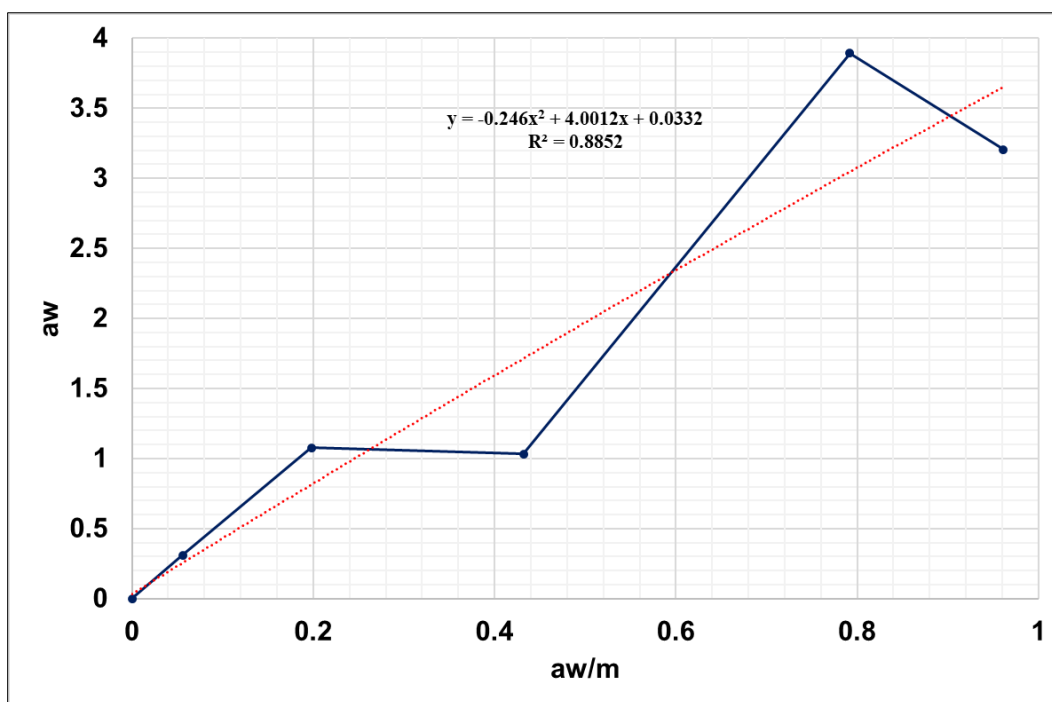


Figura 53 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de encino @ 45 °C

Con base en *Figura 53* se obtuvieron valores de $a = -0.246$, $b = 4.0012$ y $c = 0.0332$ dando de su sustitución en las relaciones ya establecidas valores de $0.249670417 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$, 1963.230835 y 0.061450223 para m_0 , G y k respectivamente.

Tabla 54 Datos finales de madera de encino @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}
45 °C	0	0.054529837	0	0
	0.056	0.180083861	0.310966234	0.218327209
	0.198	0.18368804	1.077914489	0.242708505
	0.4318	0.417652203	1.03387459	0.251770916
	0.7918	0.203439769	3.892061052	0.259851829
	0.9612	0.299941961	3.204619971	0.263207422

Fuente: Elaborada por el autor

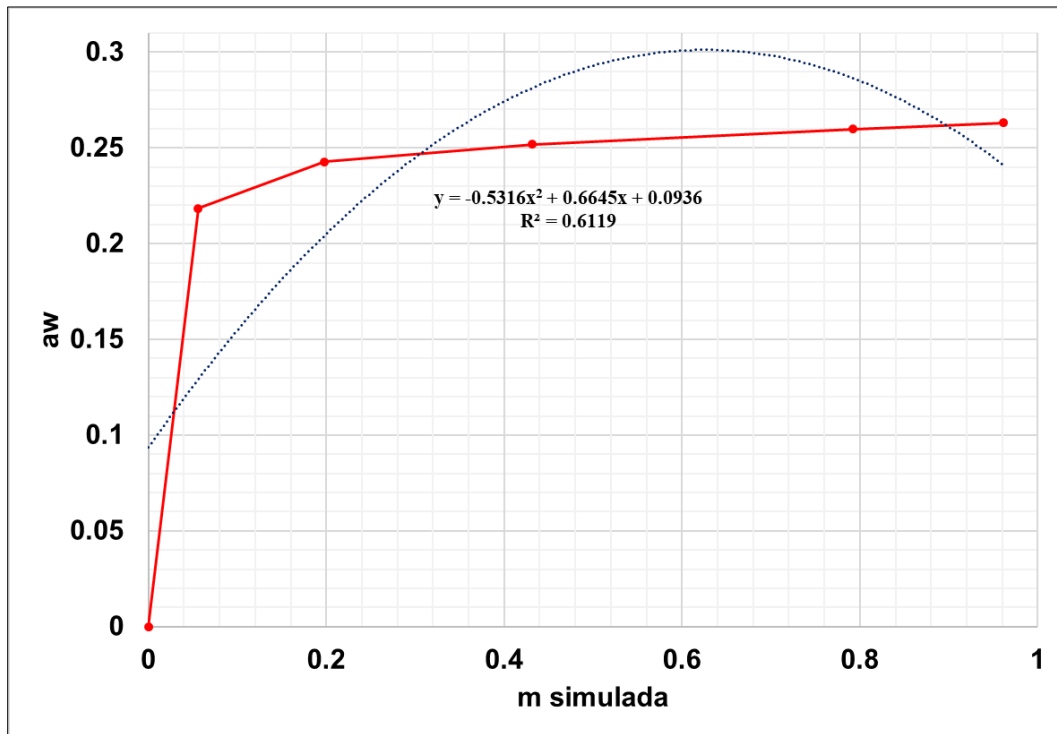


Figura 54 Isotherma de desorción simulada para madera de encino @ 45 °C

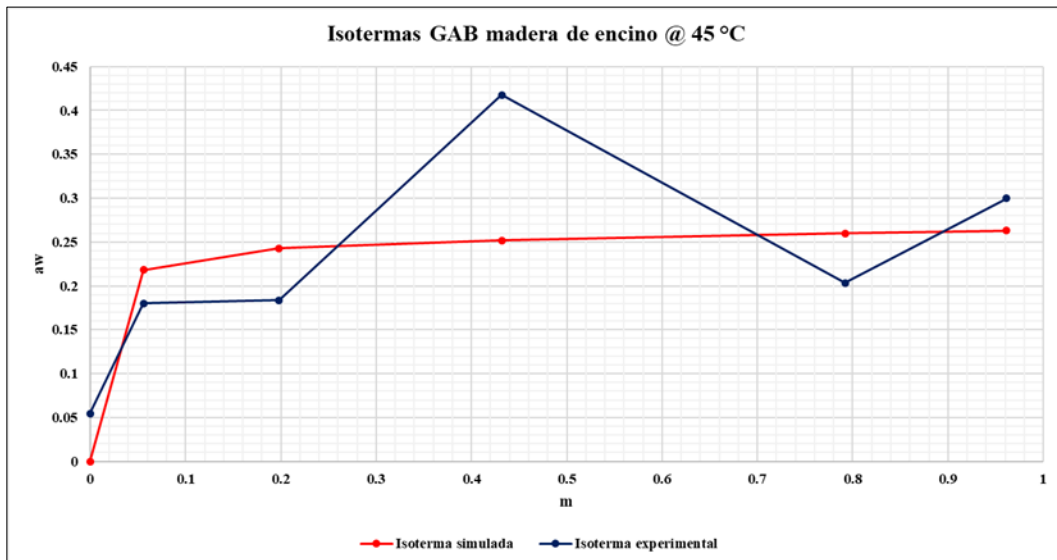


Figura 55 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de encino @ 45 °C

Tabla 55 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de encino @ 45

a_w	m_{experimental}	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.054529837	0	0.0545298
0.056	0.180083861	0.218327209	0.038243
0.198	0.18368804	0.242708505	0.05902
0.4318	0.417652203	0.251770916	0.1658813
0.7918	0.203439769	0.259851829	0.056412
0.9612	0.299941961	0.263207422	0.0367345

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 56 Datos de madera de pino @ 45 °C

Temperatura	a_w	m_{experimental}	a_w / m_{experimental}
45 °C	0	0.226791417	0
	0.056	0.231745824	0.241644052
	0.198	0.31116118	0.636326163
	0.4318	0.998605693	0.432402902
	0.7918	0.396341989	1.99776966
	0.9612	0.465475645	2.064984517

Fuente: Elaborada por el autor

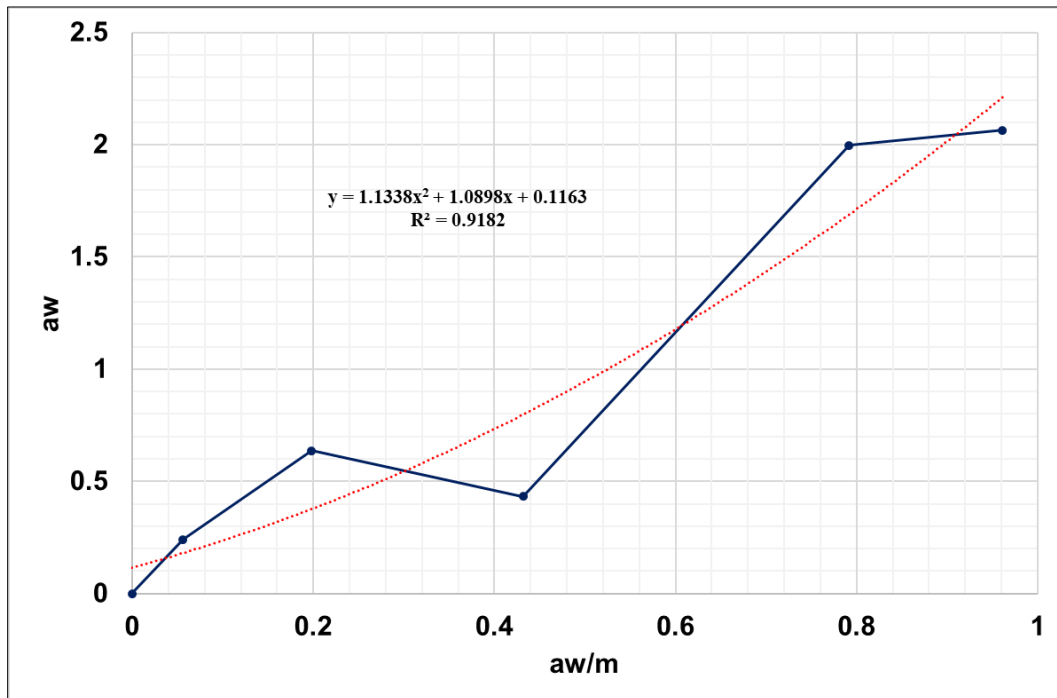


Figura 56 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de pino @ 45 °C

Del gráfico observado en la *Figura 56* se obtuvieron valores de 1.1338, 1.0898 y 0.1163 para a , b y c y derivados de estos valores de $1.230709548 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$, -5.86119635 y -1.19200601 para m_0 , G y K respectivamente.

Tabla 57 Datos finales de madera de pino @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}
	0	0.226791417	0	0
45 °C	0.056	0.231745824	0.241644052	0.309589998
	0.198	0.31116118	0.636326163	0.52585466

0.4318	0.998605693	0.432402902	0.540916991
0.7918	0.396341989	1.99776966	0.468510613
0.9612	0.465475645	2.064984517	0.434668622

Fuente: Elaborada por el autor

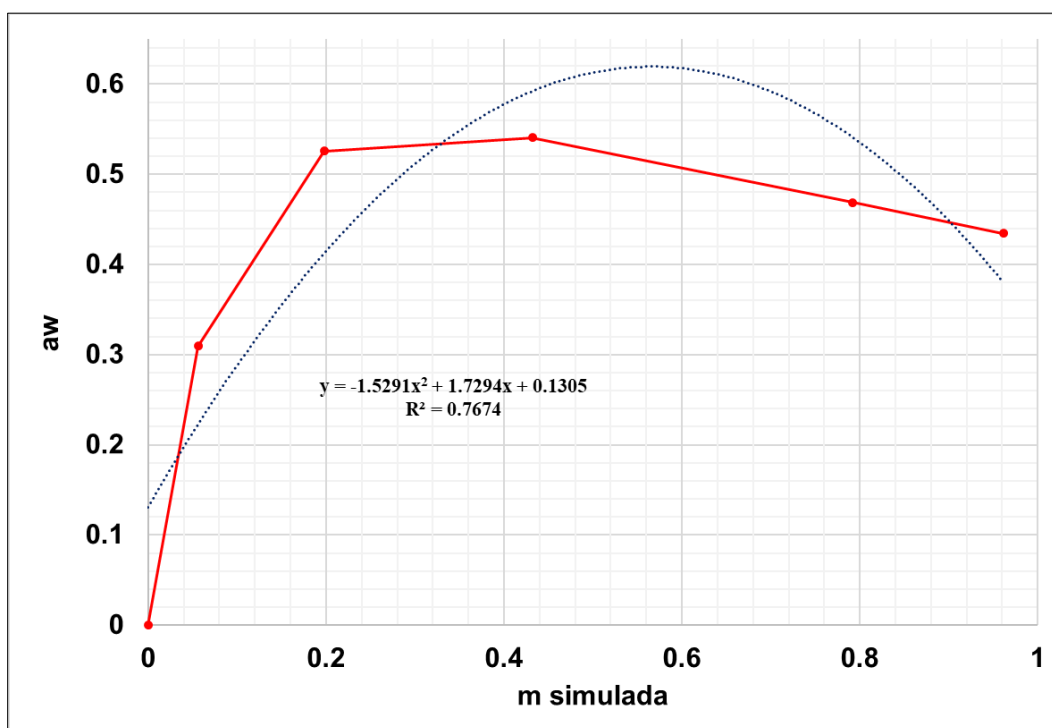


Figura 57 Isotherma de desorción simulada para madera de pino @ 45 °C

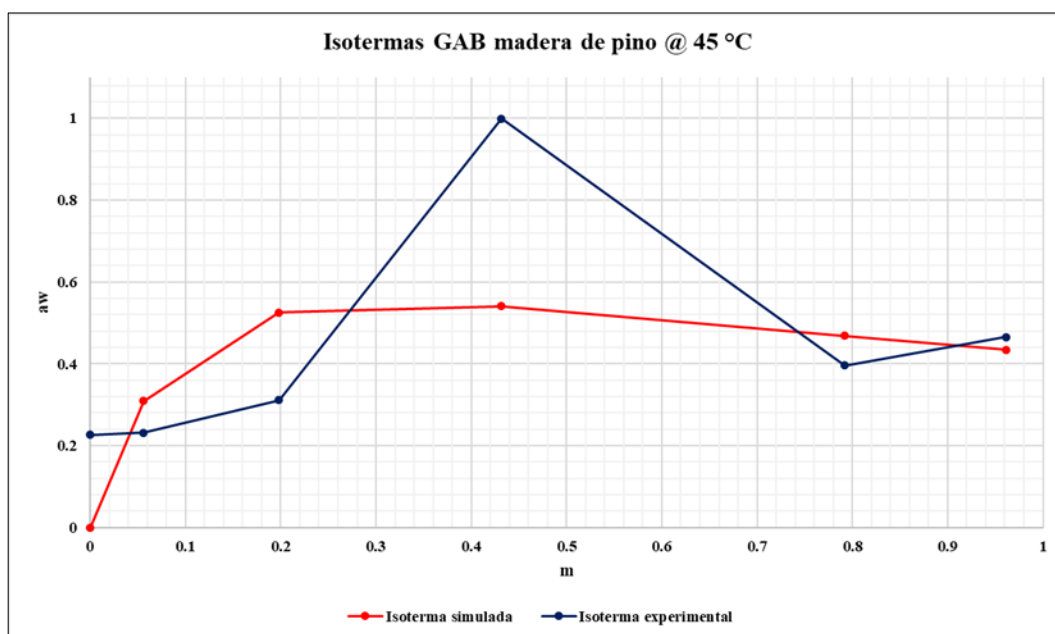


Figura 58 Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de pino @ 45 °C

Tabla 58 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de pino @ 45

a_w	$m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.226791417	0	0.2267914
0.056	0.231745824	0.309589998	0.077844
0.198	0.31116118	0.52585466	0.214693
0.4318	0.998605693	0.540916991	0.4576887
0.7918	0.396341989	0.468510613	0.072169
0.9612	0.465475645	0.434668622	0.030807

Fuente: Elaborada por el autor

Tabla 59 Datos de madera de cedro @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$
45 °C	0	0.16692339	0
	0.056	0.177947331	0.314699859
	0.198	0.364325702	0.543469756
	0.4318	1.116398022	0.386779618
	0.7918	0.333181948	2.376479293
	0.9612	0.44537339	2.158189108

Fuente: Elaborada por el autor

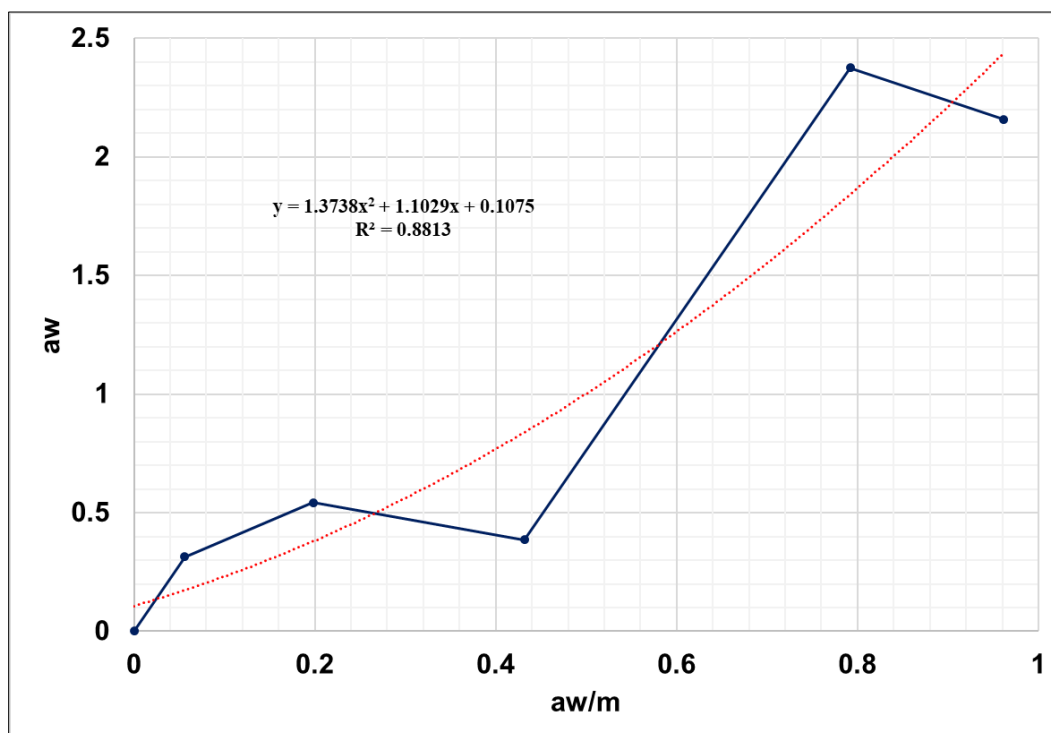


Figura 59 Regresión para el cálculo de parámetros de isoterma GAB en madera de cedro @ 45 °C

Observando y llevando a cabo la regresión lineal en el gráfico de la *Figura 59* se recopilaron valores iguales a: $a = 1.3738$, $b = 1.1029$ y $c = 0.1075$ mismos con los cuales se

obtuvieron valores para m_0 , G y k de $1.264249367 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$, -5.071757415 y -1.450775851 .

Tabla 60 Datos finales de madera de cedro @ 45 °C

Temperatura	a_w	$m_{\text{experimental}}$	$a_w / m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}
45 °C	0	0.16692339	0	0
	0.056	0.177947331	0.314699859	0.322635217
	0.198	0.364325702	0.543469756	0.52141947
	0.4318	1.116398022	0.386779618	0.514121718
	0.7918	0.333181948	2.376479293	0.429841035
	0.9612	0.44537339	2.158189108	0.394440608

Fuente: Elaborada por el autor

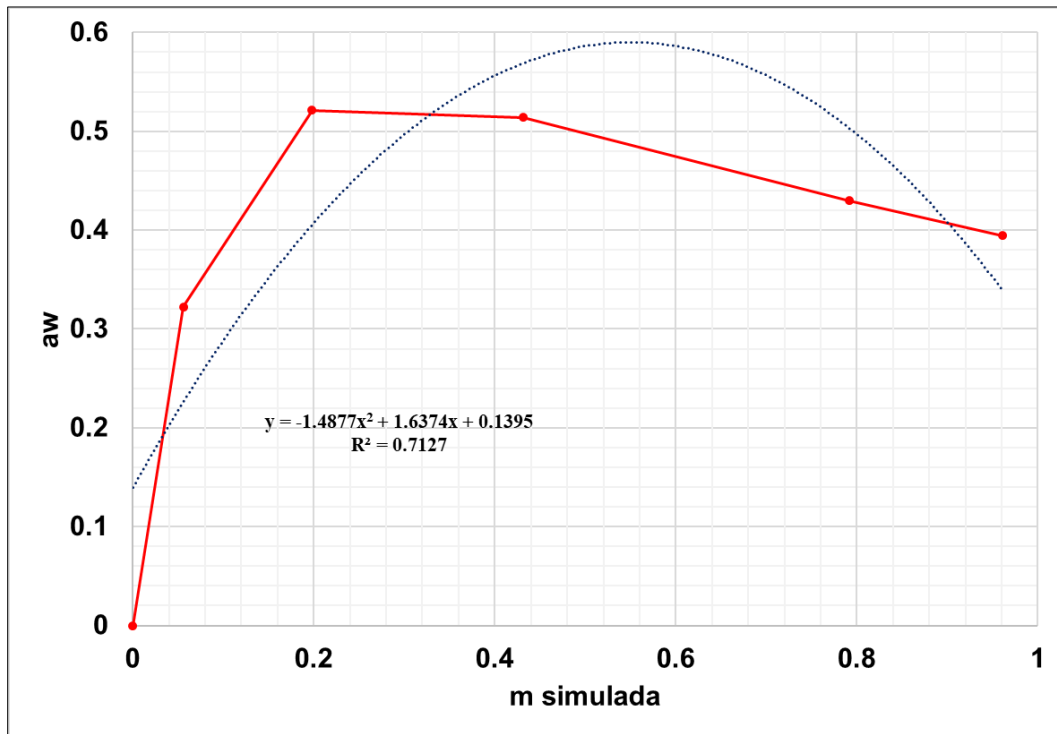


Figura 60 Isotherma de desorción simulada para madera de cedro @ 45 °C

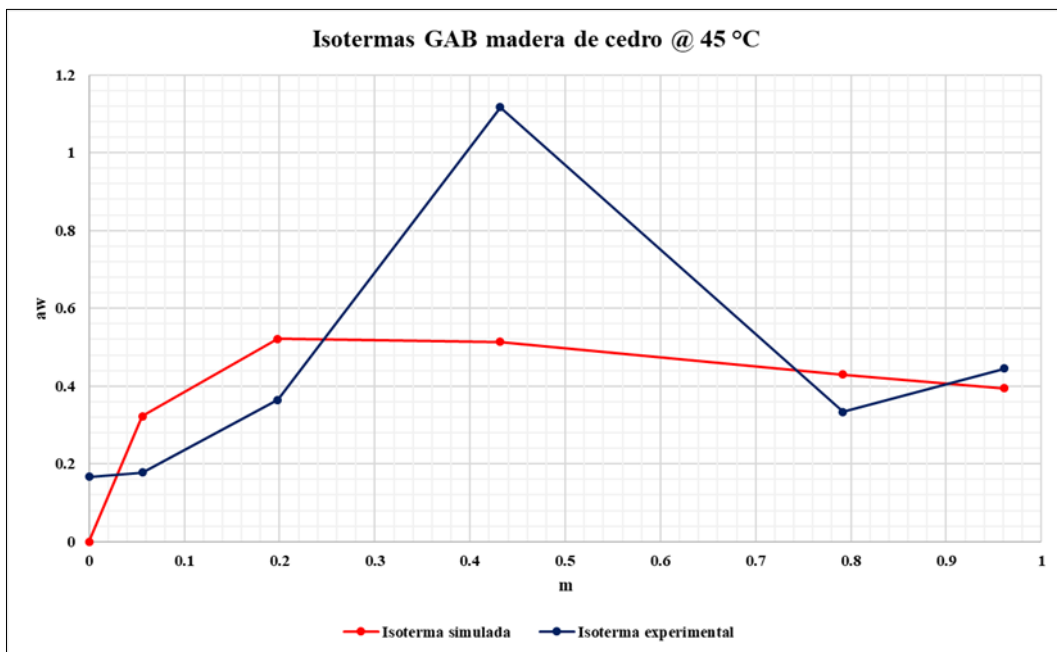


Figura 61 Isotherma de GAB experimental vs. Isotherma de GAB simulada para madera de cedro @ 45 °C

Tabla 61 Comparativa Isoterma de GAB experimental vs. Isoterma de GAB simulada para madera de cedro @ 45

a_w	$m_{\text{experimental}}$	m_{simulada}	Diferencia existente
0	0.16692339	0	0.1669234
0.056	0.177947331	0.322635217	0.144688
0.198	0.364325702	0.52141947	0.157094
0.4318	1.116398022	0.514121718	0.6022763
0.7918	0.333181948	0.429841035	0.096659
0.9612	0.44537339	0.394440608	0.0509328

Fuente: Elaborada por el autor

4.2.3 *Análisis general de Isotermas de desorción @ 35 °C*

Una vez finalizada la construcción las isotermas de desorción tanto simulada como experimental bajo el modelo de BET y GAB para los tres tipos de madera @ 35 °C se puede realizar un breve análisis presentado a continuación.

Madera de encino.

Partiendo desde la comparativa de Isoterma simulada vs. Isoterma experimental para cada uno de los modelos trabajados se enmarca la variación existente en el comportamiento de la madera de encino @ 35 °C dicha variación se evidencia no con respecto al comportamiento gráfico, porque en esa dirección ambas isotermas se comportan de forma similar por el contrario de si se realiza el enfoque en cuanto a valores de a_w ya que en ese sentido la Isoterma simulada

bajo el modelo BET presenta valores menores a los que se obtuvieron de manera experimental, destacando sobre todo la variación que se tuvo en la segunda y sexta humedad relativa trabajada puesto que en estas, la variación fue mucho más marcada con diferencias de 0.20306815 y 0.21835903 ahora bien; cuando se trata de las isotermas pertenecientes al modelo GAB estas presentaron comportamientos mucho más similares tanto en comportamiento gráfico como en valores para a_w lo cual se puede reafirmar haciendo hincapié en que la variación más notoria fue para la primer humedad relativa con un valor de 0.1008732.

Estos comportamientos entre modelos se ven respaldados por los valores de R^2 que se tienen, puesto que en el primer modelo se tuvieron valores de R^2 de 0.6226 y 0.8213 para Isoterma simulada e Isoterma experimental respectivamente mientras que para el segundo modelo dichos valores fueron de 0.8378 y 0.8213 presentando de este modo un mejor ajuste con dicho modelo.

Ahora bien, considerando solamente Isotermas experimentales se obtuvieron valores de 0.021397102 y $0.139498497 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ de m_0 para el modelo de BET y GAB los cuales indican el contenido de humedad en la monocapa, es decir la cantidad de disolvente por gramo de sólido que puede cubrir una molécula del producto; como se sabe el modelo de BET cuenta con dos parámetros de los cuales solamente uno posee significado físico mientras que en el modelo de GAB se cuentan con tres de los cuales dos poseen dicho significado, en este modelo el otro parámetro a resaltar es la constante k , la cual como anteriormente ya se había mencionado se relaciona con las energías de interacción entre sorción – desorción, esta misma caracteriza a nuestro modelo debido a que le proporciona una ventaja por encima del modelo BET ya que este último asume que la sorción se localiza en las multicapas sin interacción lateral alguna contrario

a lo que el modelo GAB sugiere puesto que en este, las moléculas ubicadas en las multicapas establecen interacción con el adsorbente en valores energéticos similares a los que existen en la monocapa, para dicha constante se registró un valor de 0.665572363.

Madera de pino.

En el caso de la madera de pino la comparativa que se realizó entre la Isoterma simulada vs. Isoterma experimental en ambos modelos @ 35 °C presentó como resultado un comportamiento gráfico poco similar y una variación notoria con respecto a valores de a_w , cuando se trata de la Isoterma simulada bajo el modelo BET, esta presenta valores menores a los que se obtuvieron de manera experimental exceptuando el valor obtenido para la sexta humedad relativa ya que en este punto, dicha isoterma presenta un valor mayor al obtenido de forma experimental; sin embargo con base en todo el comportamiento se tuvieron variaciones significativas destacando las diferencias de cinco de las seis humedades relativas empleadas. Estas diferencias poseen los siguientes valores: 0.20925901, 0.26921813, 0.25056919, 0.21827293 y 0.26526256 para la primer, segunda, cuarta, quinta y sexta humedad relativa. Por su parte en las isotermas descritas por el modelo de GAB se puede observar un comportamiento más similar en cuanto a estructura gráfica y con respecto a valores para a_w al igual que en el análisis de la madera de encino bajo las mismas condiciones y descrita por este mismo modelo, la variación de mayor relevancia se detectó en la primera humedad relativa con un valor de 0.209259. De forma general el comportamiento de las isotermas se ven sustentado con el valor que posee de R^2 , en el primer modelo se tuvieron valores de R^2 de 0.6204 y 0.8792 para Isoterma simulada e Isoterma experimental respectivamente, mientras que para el modelo de GAB dichos valores fueron de 0.7771 y 0.8792 reflejando un ajuste mayor al segundo modelo.

Llevando a cabo el análisis entre isotermas experimentales se recopilaron datos iguales a $0.024705999 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ para m_o con respecto al modelo de BET, mientras que para el modelo de GAB se obtuvieron valores de $m_o = 0.209945694 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ y 0.561805945 para k

Madera de cedro.

Para concluir los análisis @ 35 °C de Isoterma simulada vs. Isoterma experimental para el modelo BET y GAB se aborda el modelo de BET en el cual se puede apreciar una variación significativa en cuanto a comportamiento gráfico y valores de a_w , destacando cinco de los seis valores, estas variaciones poseen valores de 0.30237802, 0.32319209, 0.35122137, 0.32364975 y 0.35494388 para la primer, segunda, cuarta, quinta y sexta humedad respectivamente, contrario a los resultados mostrados por el segundo modelo ya que este solamente presenta una variación significativa que corresponde a la primer humedad relativa, esta variación posee un valor de 0.302378 y debido a esto al igual que en los casos anteriores se observa un comportamiento gráfico mucho más armónico entre ambas isotermas.

En ambos casos se tiene respaldo proveniente del valor de R^2 , ya que para el primer modelo los valores corresponden a 0.6199 y 0.9264 para la Isoterma simulada e Isoterma experimental, por su parte los valores para el segundo modelo son 0.8161 y 0.9264 nuevamente reflejando de este modo un ajuste considerado más óptimo al modelo de GAB.

Una vez finalizado el análisis previo y enfocándonos en los valores arrojados por dichos modelos se encontró como valor $m_o = 0.032329084 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ para el modelo de BET,

mientras que el modelo de GAB arrojó valores de $0.299657683 \frac{\text{kg de agua}}{\text{kg de sólido seco}}$ para m_0 y de 0.532232729 para la constante k .

4.2.4 Análisis general de Isotermas de desorción @ 45 °C

De la misma manera en que se llevó a cabo el análisis de isotermas bajo el modelo de BET y GAB para los tres tipos de madera @ 35 °C se llevó a cabo el mismo análisis @ 45 °C.

Madera de encino.

Realizada la parte experimental con madera de encino a diferentes humedades relativas @ 45 °C se pudo proceder a la comparativa de Isoterma simulada vs. Isoterma experimental en ambos modelos lo cual dio como resultado un comportamiento errático en al menos un punto en ambos casos; sin embargo de manera general, en la gran mayoría de humedades relativas la Isoterma experimental mostró un comportamiento de a_w por encima de lo esperado de manera simulada, cabe mencionar que en ambos modelos la diferencia de mayor relevancia se suscitó para la cuarta humedad relativa, no obstante en el modelo de BET esta tuvo una varianza por 0.3779811 mientras que en el modelo de GAB esta diferencia fue de 0.1658813. Aún con esto, se tiene la premisa de que existe un mejor ajuste para el primer modelo lo que se ve sustentado con los valores registrados de R^2 , esto debido a que para el primer modelo se tienen valores de 0.635 y 0.29 para Isoterma simulada e Isoterma experimental respectivamente, mientras que para el segundo modelo existen valores 0.3821 y 0.29, a pesar de esto es de importancia mencionar que la Isoterma experimental que se asemeja más con la Isoterma simulada es la generada bajo el modelo de GAB.

Una vez planteado lo anterior se registraron los datos obtenidos de cada modelo, en el caso del primer modelo se obtuvo que $m_o = 0.017507401 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ mientras que del segundo modelo se recopiló que el valor de m_o es de $0.249670417 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ y el de k igual a 0.061450223.

Madera de pino.

Cuando se analizó el comportamiento de la madera de pino @ 45 °C y su ajuste a ambos modelos, este tipo de madera presentó un comportamiento similar al obtenido en la madera de encino bajo las mismas condiciones ya que en ambos modelos los comportamientos presentan gran variación dado que la Isoterma experimental muestra valores de a_w muy variables a los simulados, así mismo otro patrón que comparte la madera de pino con la de encino a esta temperatura es la diferencia significativa en la cuarta humedad relativa teniendo como valores de diferencia 0.9343743 y 0.4576887 para el modelo BET y GAB respectivamente.

Así mismo a pesar de basarnos en el valor de R^2 obtenido para la Isoterma simulada (0.6317 y 0.2887) para ambos modelos, y que con esto se mostrara que debería existir un mejor ajuste con el modelo de BET; cuando se lleva a cabo la comparativa con el valor de R^2 para Isotermas experimentales (0.1184) se aprecia que esta se comporta más similar a la Isoterma simulada del modelo de GAB. Una vez mencionado esto, se obtuvieron valores de 0.028085627 $\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ para m_o bajo el modelo de BET mientras que siguiendo el modelo de GAB se tiene que $m_o = 1.230709548 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ y $k = -1.19200601$.

Madera de cedro.

Respecto a la madera de cedro y las comparativas de isothermas de ambos modelos @ 45 °C se pudo observar nuevamente un comportamiento lleno de variabilidad debido a los valores obtenidos experimentalmente de a_w que se colocan muy por encima de los valores simulados y al igual que los dos tipos de madera anteriores y trabajados a las mismas condiciones, la diferencia más significativa la posee la cuarta humedad relativa con valores de diferencia de 1.0559899 y 0.6022763 para modelo de BET y GAB de forma respectiva. Ahora bien, en cuanto a valores de R^2 el modelo de BET presentó valores de 0.6321 y 0.0802 por su parte el modelo de GAB denotó los siguientes valores 0.2096 y 0.0802 para Isoterma simulada e Isoterma experimental correspondientemente lo cual da por entendido que de manera simulada el modelo con mayor ajuste debería ser el modelo de BET; no obstante, la Isoterma experimental del modelo de GAB se comporta de manera más semejante a su respectiva Isoterma simulada; a su vez los parámetros obtenidos fueron $m_o = 0.026443693 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ para el primer modelo así como $m_o = 1.264249367 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ y $k = -1.450775851$ para el segundo.

Capítulo V. Conclusión

Se determinaron las propiedades de transporte de masa en madera de encino en el estado de Oaxaca a través del procedimiento y aplicación correcta del método gravimétrico a seis humedades relativas a temperaturas de 35 °C y 45 °C durante 75 y 39 días respectivamente, dichas propiedades de transporte de masa se obtuvieron inicialmente de la construcción de cinéticas de desorción así como del posterior cálculo de los respectivos parámetros de los modelos a trabajar Brunauer – Emmett – Teller (BET) y Guggenheim – Anderson – De Boer (GAB) para a su vez llevar a cabo la determinación de las isothermas de desorción tanto simuladas como experimentales que representaran nuestro fenómeno y aportaran a su debida interpretación, una vez mencionado el éxito alcanzado en cuanto a los objetivos planteados se mencionan a continuación puntos de relevancia de nuestra experimentación y determinaciones.

Con la construcción de cinéticas de desorción se permitió observar la pérdida de humedad respecto al tiempo en los tipos de madera trabajados a sus distintas condiciones, lo cual puede ser utilizado como apoyo en el diseño de sistemas de secado y almacenamiento de las mismas. Ahora bien, las cinéticas obtenidas @ 35 °C para la madera de encino presentan una mayor estabilidad en comparación a las generadas @ 45 °C, debido a que bajo la primer temperatura se presentan cinco comportamientos de desorción y una buena estabilización en el contenido de humedad en comparación a los dos tipos de madera restantes; mientras que @ 45 °C la madera de encino presenta solamente cuatro comportamientos de desorción y tres de estos poseen variaciones marcadas en su comportamiento de sorción – desorción en diversas horas, es de esta manera como a esta temperatura se considera más estable la madera de Pino.

Derivado de lo anterior y basados en los comportamientos arrojados gráficamente, se considera más óptimo el secado de madera de encino a una temperatura de 45 °C siempre y

cuando la HR tenga un valor de 0%, de no ser así se optará por un secado @ 35 °C con humedades relativas recomendadas de 0%, 20.78% y 6.73% dada su influencia en el secado de nuestra madera.

Como se mencionó a lo largo del trabajo el intervalo de HR se definió a través del uso de seis soluciones de distintas sales, generando así ambientes de HR @ 35 °C de 0%, 6.73%, 20.7%, 43.18%, 79.78% y 96.71%; y @ 45 °C de 0%, 5.60%, 19.80%, 43.18%, 79.18% y 96.12% mismas que al ser aplicadas permitieron la construcción de Isotermas de desorción tanto simuladas como experimentales bajo un ajuste a dos diferentes modelos de sorción (BET y GAB); así como su comparación y evaluación; mismas que arrojaron que cuando se trata de simulación, el modelo que presenta un mejor ajuste dado su valor de coeficiente de relación (R^2) es el Modelo Brunauer – Emmett – Teller (BET); sin embargo, debido al comportamiento de nuestros datos experimentales y su comparativa gráfica, se determinó que la mejor calidad de ajuste conforme a los datos experimentales la presentó el Modelo Guggenheim – Anderson – De Boer (GAB) dado su rango más amplio de humedad y temperatura, basado en esto se considera a este como el modelo idóneo para el ajuste, predicción y graficación de las Isotermas de desorción en madera de encino, así como de los dos tipos de madera restante, cabe mencionar que el desarrollo de estos modelos proporciona información sobre la capacidad de retención de humedad así como su interacción con el ambiente circundante.

En cuanto al cálculo de parámetros, este no fue llevado a cabo por medio de la reducción de suma de errores cuadráticos debido al comportamiento de los datos experimentales por ello optó por realizar la linealización de las ecuaciones de ambos modelos de sorción, aun con esto cabe mencionar que Excel utiliza la suma de errores cuadráticos en la obtención de valores de regresión, por lo que se considera el uso de la suma de errores cuadráticos de manera indirecta.

Una vez teniendo los parámetros se observa que para ambas temperaturas el modelo de BET presenta valores menores para m_0 para todos los tipos de madera a ambas temperaturas en comparación al modelo de GAB, dichos valores fueron los siguientes. Para 35 °C y conforme al modelo de BET, el valor de m_0 fue de $0.0213971 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$, $0.024706 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ y $0.0323291 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$; mientras que bajo el modelo de GAB los valores fueron de 0.1394985 $\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$, 0.2099457 $\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ y 0.2996577 $\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ y de 0.6655724, 0.5618059, 0.5322327 para la constante k para encino, pino y cedro respectivamente.

En cuanto a la segunda temperatura de experimentación que corresponde a 45 °C los parámetros obtenidos en el primero modelo fueron $0.0175074 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$, 0.0280856 $\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ y $0.0264437 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ los cuales son contrastados con los determinados por medio del segundo modelo que poseen valores de $0.2496704 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$, 1.2307095 $\frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ y $1.2642494 \frac{kg \text{ de agua}}{kg \text{ de sólido seco}}$ para m_0 , y de 0.0614502, -1.192006 y -1.450776 para k .

Observando los valores resultantes para m_0 y k se concluye que la madera de encino en ambas temperaturas presenta un menor contenido de agua en comparación con los otros dos tipos de madera, siendo la madera de cedro la que posee un valor mayor de m_0 @ 35 °C para ambos modelos, mientras que @ 45 °C en el modelo de BET es la madera de pino por su parte bajo el modelo de GAB a dicha temperatura al igual que en la primer temperatura es la madera de cedro.

De manera general los resultados recopilados a lo largo del trabajo ya presentado contribuyen de manera directa al conocimiento de propiedades de transporte de masa en nuestra madera ya que por medio o a partir de los parámetros calculados, modelos desarrollados y

cinéticas e isothermas de desorción construidas se brinda información de utilidad en el diseño y optimización de procesos; así como para la implementación de buenas prácticas de manejo en la industria maderera.

Capítulo VI. Referencias

- Acuerdo de Cartagena. Junta, Comisión del Acuerdo de Cartagena, JUNAC. Proyecto Subregional de Promoción Industrial de la Madera para Construcción. PRID - Madera, Junta del Acuerdo de Cartagena, & Proyecto Subregional de Promoción Industrial de la Madera Para Construcción. (1989). *Manual del grupo andino para el secado de maderas*. Junta del Acuerdo de Cartagena.
- Adelizzi, D. (2021, 24 noviembre). *Legno termotrattato per le pavimentazioni in legno*. *Professional Parquet*. <https://www.professionalparquet.it/2021/11/22/legno-termotrattato-per-le-pavimentazioni-in-legno/>
- Admin, C. (2022, 25 mayo). *Balanza analítica de precisión. Ve-204 - Productos Cis-Lab*. Centro Integral de Servicio para Laboratorio. <https://www.cislab.mx/p/balanza-analitica-de-precision-ve-204/>
- Álvarez Noves, H., & Fernández, J. I. (1996). *Humedad de la madera en la construcción: valores recomendados y riesgo de cambio dimensional, en España*. Centro de Investigación Forestal (CIFOR-INIA). https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2800_10142.pdf
- Ángeles, C. (2012, diciembre). *Modelado de la cinética del secado del pimiento (Capsicum annum L.) variedad piquillo*. Universidad Nacional Del Callao. https://unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/IF_DICIEMBRE_2012/IF_ANGELES%20QUEIROLO_FIQ.pdf
- Anta, S. (2016). *Diagnóstico de la cadena de valor forestal en las regiones de Oaxaca*. <http://www.coplade.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/2017/04/Perfiles/AnexosPerfiles/4.%20CV%20FORESTAL.pdf>

- Atkins, P. (1999). *Química Física* (6.^a ed.). Ediciones Omega.
- Arostegui, A. (1982). *Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de la madera peruana*. Fortalecimiento de los programas de desarrollo forestal en la selva central.
- Avramidis, S. (1992). Enthalpy-entropy compensation and thermodynamic considerations in sorption phenomena. *Wood science and technology*, 26(5), 329–333.
<https://doi.org/10.1007/bf00226074>
- Baraúna, E. E. P., & Oliveira, V. S. D. (2009). *Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (Dinizia excelsa Ducke), guariúba (Clarisia racemosa Ruiz & Pav.) e tauari vermelho (Cariniana micrantha Ducke) em diferentes condições de temperatura e umidade relativa. Acta amazonica*, 39(1), 91–95. <https://doi.org/10.1590/s0044-59672009000100009>
- Barreiro, S., & Hirsch, T. (2011). *Protección de la madera*. Recuperado 20 de junio de 2022, de http://www.fadu.edu.uy/tesinas/files/2012/08/Silvana-Barreiro-Tatiana-Hirsch_TESINA_Protección-de-la-Madera_aprobado-7.pdf
- Battroid. (2009, 2 agosto). *Mapa del municipio de San Pedro Yolo en el estado de Oaxaca, México* [Ilustración]. San Pedro Yolo en Oaxaca.
https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:San_Pedro_Yolo_en_Oaxaca.svg
- Bergthaller, W. (1975). Kneule, F.: Das Trocknen (aus der Reihe „Grundlagen der chemischen Technik“, Herausgeber H. Mohler, O. Fuchs, H. Kraussold und K. Dialer). Verlag Sauerländer AG, Aarau und Frankfurt/M. 1975. 720 Seiten, mit 535 Abb., Leinen, DM 55, –. *Starch - Stärke*, 28(5), 186. <https://doi.org/10.1002/star.19760280514>
- Berthold, J., Rinaudo, M., & Salmeñ, L. (1996). Association of water to polar groups; estimations by an adsorption model for ligno-cellulosic materials. *Colloids and surfaces*

- A: *Physicochemical and engineering aspects*, 112(2–3), 117–129.
[https://doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03419-6](https://doi.org/10.1016/0927-7757(95)03419-6)
- BOLFOR, & Viscarra, S. (1998). *Guía práctica para el secado de madera en hornos* [Libro electrónico]. El País.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the american chemical society*, 60(2), 309–319.
<https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
- Caulfield, D. F. 1978: *The effect of cellulose on the structure of water: view 2. In: Fibre water interactions in paper-making*. Volume 2. London: The british paper and board industry federation
- Centro de Innovación Productiva y Transferencia Tecnológica de la Madera – CITEmadera, & Ugarte, J. (2017). *Manual para operadores de secadores convencionales para madera*. Karl Heinz.
- Centro de Innovación Tecnológico de la Madera. (2009). *Técnicas de secado de la madera* (1.^a ed.) [Libro electrónico].
- Comisión Nacional Forestal. (2011). *Consideraciones tecnológicas en la protección de la madera*. SEMARNAT. <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Consideraciones-tecnologicas-de-la-madera.pdf>
- Comisión Nacional Forestal. (2018, octubre). *Lidera México en producción y consumo de madera de pino en América Latina y El Caribe*.
<https://www.gob.mx/conafor/prensa/lidera-mexico-en-produccion-y-consumo-de-madera-de-pino-en-america-latina-y-el-caribe>

- Comisión Nacional Forestal. (2019, mayo). *Oaxaca, tercer lugar nacional en producción maderable*. <https://www.gob.mx/conafor/prensa/oaxaca-tercer-lugar-nacional-en-produccion-maderable>
- Córdoba, R. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Kurú: Revista forestal*, 2–5.
- Cortés, F. B., Chejne, F., & Rojano, B. (2011). A new model for predicting sorption isotherm of water in foods. *International journal of food engineering*, 7(2).
<https://doi.org/10.2202/1556-3758.2254>
- DataMÉXICO. (2021). *Michoacán de Ocampo: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública*. Recuperado 2 de abril de 2022, de <https://datamexico.org/es/profile/geo/michoacan-de-ocampo-mi?redirect=true>
- Del Valle, H. (2022, 6 agosto). *Hornos de secado para madera*. Maquinaria y maderas.
<https://maquinariaymaderas.com/hornos-de-secado-para-madera/>
- De la Paz Pérez Olvera, C., Vélez Jiménez, S., & Ceja Romero, J. (2016). Anatomía de la madera de ocho especies de *Quercus* (FAGACEAE) de Oaxaca, México. *Madera y bosques*, 12(1), 63–94. <https://doi.org/10.21829/myb.2006.1211251>
- ECOSHEL. (2021). *Horno de secado horizontal 9023A, 9053A Manual de uso*.
- Engelund, E. T., Thygesen, L. G., Svensson, S., & Hill, C. A. S. (2012). A critical discussion of the physics of wood–water interactions. *Wood science and technology*, 47(1), 141–161.
<https://doi.org/10.1007/s00226-012-0514-7>
- Estrada, J. (2016). *Modelación de fenómenos de adsorción en problemas de flujo y transporte en medios porosos a condiciones controladas de laboratorio*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10336/Tesis.pdf?sequence=3>
- Farkas, I., Seres, I., & Mészáros, C. (1999). Analytical and experimental study of a modular solar dryer. *Renewable energy*, 16(1–4), 773–778. [https://doi.org/10.1016/s0960-1481\(98\)00278-x](https://doi.org/10.1016/s0960-1481(98)00278-x)
- Fennema, O. (1992). *Química de alimentos* (1.^a ed.). Acribia.
- Gal S. The need for, and practical applications of sorption data. In: Jowitt R., Escher F., Hallstrom B., Mefert H., Spiess W., Vos G., editors. *Physical properties of foods-2*. Elsevier applied science; London: 1987. pp. 13–25
- García, F., Simón, C., García, L., de Palacios, P., Fernández, J., & Conde, M. (2013). *Estudio comparativo del método de cámara y de sales saturadas en la obtención de los puntos de humedad de equilibrio higroscópico de la limba (Terminalia superba Engl. & Diels.)*. Sociedad española de ciencias forestales.
- García, L., Guindeo Casasús, A., de Palacios, P., & García, F. (2004). Histéresis de la madera de *Pinus sylvestris* L. para isoterma de 35 °C mediante el método de sales saturadas. *Materiales de construcción*, 54(276), 51–64. <https://doi.org/10.3989/mc.2004.v54.i276.255>
- García, Y. (2012). Los encinos: Un tesoro poco valorado. *Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Veracruzana*, 25. <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol25num2/articulos/encinos/>
- Giménez, A. M., Moglia, J. G., Hernández, P., & Gerez, R. (2005). *Anatomía de madera* (2.^a ed.). <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/sd-1-anatomia-de-madera.pdf>

- Goring, D. A. I. 1978: *The effect of cellulose on the structure of water: view 1. In: Fibre water interactions in paper-making*. Volume 2. London: The british paper and board industry federation
- Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of research of the national bureau of standards section A: Physics and chemistry*, 81A(1), 89–96. <https://doi.org/10.6028/jres.081a.011>
- Guatibonza, M. (2010, 16 julio). *Sistemas de secado para madera*. Tratamientos innovadores en procesos productivos, sistemas constructivos y tratamientos relacionados con la transformación y conservación de maderas.
<http://mueblesdomoticos.blogspot.com/2010/08/sistemas-de-secado-para-madera.html>
- Gutiérrez, J. (2016). *Evolución temporal de la humedad de la madera de «Pinus pinaster» Ait. En pilas secadas al aire en la zona centro de la Península Ibérica*. Universidad de Valladolid. Escuela técnica superior de ingenierías agrarias.
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/16379>
- H. Ayuntamiento de San Pedro Yolo. (s. f.). *OAXACA - San Pedro Yolo. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Recuperado 16 de mayo de 2022, de
<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM20oaxaca/municipios/20336a.html>
- Hailwood, A. J., & Horrobin, S. (1946). Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. *Transactions of the faraday society*, 42, B084.
<https://doi.org/10.1039/tf946420b084>
- Hartley, I. (1994). *Characterization of water in wood below the fibre saturation point*. The University of British Columbia.
- Hartley, I. (2006). *Wood: moisture content hygroscopicity and sorption*. Andreas Mortensen.

- Hartley, I., Kamke, F., & Peemoeller, H. (1992). Cluster theory for water sorption in wood. *Wood science and technology*, 26(2). <https://doi.org/10.1007/bf00194465>
- Hernández, E. (2011, abril). *Modelado matemático del secado de madera subtropical por convección de aire caliente*.
<http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/15621>
- IUPAC. (1972). *Manual of symbols and terminology. Appendix 2: Pure and surface chemistry*. Pure and applied chemistry.
- Joly, C., Gauthier, R., & Escoubes, M. (1996). Partial masking of cellulosic fiber hydrophilicity for composite applications. Water sorption by chemically modified fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 61(1), 57–69.
- Lanchas, Á. (2018). La tecnología por microondas de secado de barnices. *Protección de la madera*. Recuperado 6 de septiembre de 2022, de <https://protecciondelamadera.com/la-tecnologia-por-microondas-de-secado-de-barnices/>
- Marcos, B. R., Esteban, M. A., López, P. S., Alcalá, M., Gómez, R., Espejo, J. M. R., & Marcos, A. (1997). Monolayer values at 30°C of various spices as computed by the BET and GAB models. *Zeitschrift fur Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung. A, European food research and technology*, 204(2), 109-112. <https://doi.org/10.1007/s002170050046>
- Matiauda, M. (1999, junio). *Modelo de secado de madera de pino Eliotti a temperaturas moderadas*. Universidad Nacional de Misiones. Facultad de ciencias exactas, químicas y naturales. Secretaría de investigación y postgrado. Maestrías en madera, celulosa y papel.
- Montoya, J. (2007). Determinación de las curvas isotermas de sorción y el PSF - Punto de saturación de fibra de la especie de bambú *Phyllostachys pubescens* Mazel. *Scientia et technica*, 35, 497–502

- Mujumdar, A. (2008). *Handbook of industrial drying* (3.^a ed.). India: Three s colors publications.
- Murthy, M. R. (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(4), 835–844.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.02.010>
- Natarén, J. (2015, mayo). *Estudio de transferencia de masa en agromateriales*. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca.
- Ocon, J., & Tojo, G. (1980). *Problemas de ingeniería química: Vol. Tomo II* (3.^a ed.). Aguilar.
- Peng, G., Chen, X., Wu, W., & Jiang, X. (2007). Modeling of water sorption isotherm for corn starch. *Journal of food engineering*, 80(2), 562–567.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.063>
- Perré, P., Mosnier, S., & Turner, I. W. (2004). Vacuum drying of wood with radiative heating: I. Experimental procedure. *AIChE Journal*, 50(1), 97–107.
<https://doi.org/10.1002/aic.10009>
- Perré, P., & Turner, I. W. (2006). A dual-scale model for describing drier and porous medium interactions. *AIChE Journal*, 52(9), 3109–3117. <https://doi.org/10.1002/aic.10918>
- Ping, Z., Nguyen, Q., Chen, S., Zhou, J., & Ding, Y. (2001). States of water in different hydrophilic polymers — DSC and FTIR studies. *Polymer*, 42(20), 8461–8467.
[https://doi.org/10.1016/s0032-3861\(01\)00358-5](https://doi.org/10.1016/s0032-3861(01)00358-5)
- Rivera, J., & Pérez, M. (2006). Empleo del sistema potenciométrico Karl - Fischer en el desarrollo y la certificación de materiales de referencia (MR). *Centro Nacional de Metrología, Metrología de Materiales Orgánicos*, 1–5.
<https://www.cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Octubre%2025/Bloque%20A/A2-QUIMICA%20I-Materiales%20de%20Referencia/A2-3.pdf>

Rowell, R. M. (2021). *Handbook of wood chemistry and wood composites* (2.^a ed.). CRC Press.

Saavaedra, C. (2014). *Guía práctica para el secado de madera en hornos convencionales*.

SERFOR.

http://www.cnf.org.pe/py_ejecucion/valor_agregado/Guia_practica_para_el_secado_de_madera_Arequipa_diciembre_2014.pdf

Salas, C., Moya, R., & Córdoba, R. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera [Ilustración]. En *Kurú: Revista forestal* (5.^a ed., p. 3).

Sandoval, S. (2016). Modelación matemática del secado convencional de madera. *Madera y bosques*, 15(1), 75–89. <https://doi.org/10.21829/myb.2009.1511198>

SEMARNAT. (2018). *Anuario estadístico de la producción forestal 2018*. Dirección general de gestión forestal y de suelos.

<https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>

Sharp, A. R., Riggin, M. T., Kaiser, R., & Schneider, M. H. (1978). Determination of moisture content of wood by pulsed nuclear magnetic resonance. *Wood and fiber*, 10(2), 74–81.

Shusheng, P., Keey, R., & Langrish, T. (1995). Modelling the temperature profiles within boards during the high-temperature drying of *Pinus radiata* timber: the influence of airflow reversals. *International journal of heat and mass transfer*, 38(2), 189–205.

[https://doi.org/10.1016/0017-9310\(95\)90001-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(95)90001-2)

Simón, C. (2015). *Determinación de la higroscopicidad y comportamiento termodinámico de la madera juvenil y madura a través de sus isotermas de sorción*. Universidad Politécnica de Madrid.

Skaar, C. (1988). *Wood - Water relations* (1.^a ed.). Springer series in wood science.

- Telkki, V. V., Yliniemi, M., & Jokisaari, J. (2013). Moisture in softwoods: fiber saturation point, hydroxyl site content, and the amount of micropores as determined from NMR relaxation time distributions. *Holzforschung*, 67(3), 291–300. <https://doi.org/10.1515/hf-2012-0057>
- Terziev, N. (1995). Migration of Low-Molecular sugars and nitrogenous compounds in pinus sylvestris L. During kiln and air drying. *hfsq*, 49(6), 565–574.
<https://doi.org/10.1515/hfsg.1995.49.6.565>
- Thygesen, L. G., Tang Engelund, E., & Hoffmeyer, P. (2010). Water sorption in wood and modified wood at high values of relative humidity. Part I: Results for untreated, acetylated, and furfurylated Norway spruce. *Holzforschung*, 64(3), 315–323.
<https://doi.org/10.1515/hf.2010.044>
- Trelease, W. (1924). *The american oaks: Memoirs of the national academy of sciences* (Vol. 20).
<https://doi.org/10.5962/bhl.title.142965>
- Turner, I. W., & Perré, P. (2004). Vacuum drying of wood with radiative heating: II. Comparison between theory and experiment. *AIChE Journal*, 50(1), 108–118.
<https://doi.org/10.1002/aic.10010>
- Valencia, S. (2004). Diversidad del género Quercus (Fagaceae) en México. *Botanical sciences*, 75, 33–53. <https://doi.org/10.17129/botsci.1692>
- Viades, J. (2008). *Adsorción de agua en alimentos. Isoterma de adsorción de Guggenheim, Anderson y de Boer (GAB)*. Seminario de Investigación: Fenómenos de superficie, postgrado en ciencias químicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Víglasky, J., Langova, N., & Horbaj, P. (2006). A solar timber-dryer equipped with an air collector. *Communications - Scientific letters of the university of zilina*, 8(2), 5–9.
<https://doi.org/10.26552/com.c.2006.2.5-9>

- Vignote, S., & Martínez, I. (2006). *Tecnología de la madera* (3.^a ed.). Ediciones Mundi - Prensa.
<https://tecno1di.files.wordpress.com/2016/03/madera.pdf>
- Wallace, J. W., Hartley, I. D., Avramidis, S., & Oliveira, L. C. (2003). Conventional kiln drying and equalization of western hemlock (*tsuga heterophylla* (Raf.) [Sarg]) to japanese equilibrium moisture content. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 61(4), 257–263.
<https://doi.org/10.1007/s00107-003-0395-4>
- Wang, J., Mukhopadhyaya, P., & Morris, P. I. (2012). Sorption and capillary condensation in wood and the moisture content of red pine. *Journal of building physics*, 37(4), 327–347.
<https://doi.org/10.1177/1744259112453829>
- Wexler, A. & United States. National Bureau of Standards. (1965). *Humidity and moisture*. Van haren publishing.
- Yang, S., Han, Y., Chang, Y., Park, Y., Lee, J., Eom, C., & Yeo, H. (2014). Near-Infrared spectroscopic analysis for classification of water molecules in wood by a theory of water mixtures. *Wood and fiber science*, 46, 138–147.
- Yanniotis, S., & Blahovec, J. (2009). Model analysis of sorption isotherms. *LWT - Food science and technology*, 42(10), 1688–1695. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.010>
- Zhao, H., & Turner, I. (2000). The use of a coupled computational model for studying the microwave heating of wood. *Applied mathematical modelling*, 24(3), 183–197.
[https://doi.org/10.1016/s0307-904x\(99\)00034-7](https://doi.org/10.1016/s0307-904x(99)00034-7)
- Zimm, B. H., & Lundberg, J. L. (1956). Sorption of vapors by high polymers. *The journal of physical chemistry*, 60(4), 425–428. <https://doi.org/10.1021/j150538a010>