

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**"ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE
ÁRBOLES EN PIE DE CAOBA (*Swietenia
macrophylla* KING) EN EL
DEPARTAMENTO DE UCAYALI, PERÚ"**

Presentado por:

Claudia Nelly Romero Saavedra

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú
2017

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por la ex-alumna de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. **CLAUDIA NELLY ROMERO SAAVEDRA**, intitulado “ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ÁRBOLES EN PIE DE CAOBA (SWIETENIA MACROPHYLLA KING) EN EL DEPARTAMENTO DE UCAYALI, PERÚ”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de

En consecuencia queda en condición de ser considerada APTA y recibir el título de INGENIERO FORESTAL.

La Molina, 9 de diciembre de 2016

.....
Mg. Sc. Carlos Alberto Llerena
Pinto
Presidente

.....
Ing. Carlos Vargas Salas
Miembro

.....
Ing. Juan Carlos Ocaña Canales
Miembro

.....
Mg. Sc. Víctor Barrena Arroyo
Asesor

DEDICATORIA

A mi familia: Ivan, Haydeé y Roberto.

Por darme un hogar de felicidad; por brindarme cariño y amor incondicional en cualquier circunstancia de mi vida; por todo el esfuerzo y sacrificio que realizan día a día por darme lo mejor.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el profesor Víctor Barrena Arroyo; por toda su paciencia, dedicación y orientación en el desarrollo de la presente tesis. Por su incondicional apoyo, su valiosa amistad y sus sabias enseñanzas dentro y fuera de las aulas, que me permiten ser mejor persona y profesional.

*Agradezco también al profesor Ignacio Lombardi, coordinador del proyecto UNALM-ITTO PD 251/03 Rev. 3 (F): “Evaluación de las existencias comerciales y estrategias para el manejo sostenible de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el Perú”, por los datos brindados para la realización del presente.*

A Macu y Leo, quienes siempre me tuvieron fe y me motivaron desde el inicio a involucrarme en el “complicado” mundo de las ecuaciones. Por sus innumerables consejos y su infinito apoyo en este largo camino.

RESUMEN

El presente estudio se realizó con los datos de 103 individuos de caoba (*Swietenia macrophylla* King) evaluados en el departamento de Ucayali en el año 2006, a través del proyecto UNALM-ITTO PD 251/03 Rev. 3(F) “Evaluación de las existencias comerciales y estrategia para el manejo sostenible de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el Perú”. El objetivo fue lograr la mayor precisión en la estimación del volumen de los árboles en pie de caoba del departamento de Ucayali, a través de la elaboración, evaluación y selección de la ecuación de volumen más confiable para el área de estudio. Se ordenaron y analizaron los datos brindados, se calculó el volumen total de cada individuo y se eliminaron los valores atípicos. Se seleccionaron 24 modelos de ecuaciones a partir de bibliografía de estudios similares y se realizó la regresión lineal basada en los mínimos cuadrados a través de la herramienta “Análisis de Datos” del software Microsoft Excel. Para la selección de ecuaciones, se analizaron los resultados y se tomó en cuenta los siguientes criterios estadísticos: el coeficiente de determinación (R^2), las pruebas de significancia estadística Fisher y t-Student y el análisis gráfico de residuos para determinar la homogeneidad de varianzas (homocedasticidad). Fueron 12 los modelos de ecuaciones que cumplieron con los criterios estadísticos pero que no presentaron homocedasticidad. Ante ello, se realizó la regresión ponderada, donde se agregaron pesos o factores de ponderación a cada modelo seleccionado, obteniendo así 506 nuevas ecuaciones ponderadas, que fueron analizadas y seleccionadas de acuerdo a los criterios estadísticos mostrados anteriormente. Solo cinco modelos de ecuaciones ponderadas lograron homogenizar la varianza de sus residuos, y para seleccionar la mejor ecuación se calculó y comparó su Índice de Furnival, donde se llegó a la conclusión que la mejor ecuación que estima el volumen de los árboles de caoba de Ucayali es: $V = - 0,110787 + 0,651536dap^2 + 0,465085dap^2h$.

Palabras claves: *Swietenia macrophylla*, Ucayali, Dendrometría, Volumen, Modelos Matemáticos, Métodos Estadísticos.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura	3
1. Características de la caoba	3
1.1. Características generales	3
1.2. Descripción botánica	4
1.3. Distribución ecológica y geográfica.....	5
1.4. Características, propiedades y uso de la madera.....	8
1.5. Situación CITES	9
2. Estimación del volumen de los árboles	10
2.1. Muestra.....	10
2.2. Medición de los árboles en campo	11
2.2.1. Medición del diámetro:	11
2.2.2. Medición de la altura:.....	11
2.3. Cálculo de volumen.....	12
2.4. Ecuaciones de volumen.....	14
2.5. Análisis de regresión lineal.....	17
2.6. Análisis de regresión ponderada	24
2.7. Índice de Furnival	25
III. Materiales y Métodos	27
1. Descripción del lugar de estudio	27
2. Equipos y materiales	31
2.1. Equipos	31
2.2. Software	31
2.3. Materiales	31
2.4. Datos	32
3. Metodología	34
3.1. Datos de campo	35
3.1.1. Sistematización de los datos de campo	35
3.1.2. Cálculo de volúmenes individuales.....	35
3.1.3. Análisis de variables	35
3.2. Ecuaciones.....	36
3.2.1. Selección de Modelos de ecuaciones.....	36
3.2.2. Análisis de Regresión	36
3.2.3. Análisis de regresión ponderada.....	37
3.3. Elección de la mejor ecuación.....	39
IV. Resultados y discusión	41
1. Datos de campo	41
1.1. Ordenamiento de los datos de campo	41
1.2. Cálculo de volúmenes individuales.	43
1.3. Análisis de variables.....	44
2. Ecuaciones	47
2.1. Selección de modelos de ecuaciones	47
2.2. Análisis de Regresión	48
2.3. Análisis de Regresión ponderada	57
3. Elección de la mejor ecuación	60

3.1. Índice de Furnival.....	60
V. Conclusiones	63
VI. Recomendaciones	65
VII. Referencias bibliográficas.....	67
VIII. Anexos.....	73

Índice de tablas

Página

Tabla 1:	Modelos de ecuaciones más usados.....	16
Tabla 2:	Clasificación de Uso Mayor de tierras en Ucayali	29
Tabla 3:	Tipos de bosque, usos de la tierra y cobertura vegetal.....	31
Tabla 4:	Datos de diámetros y alturas ordenados.	41
Tabla 5:	Volumen (m ³) de árboles individuales.	43
Tabla 6:	Modelos de ecuación de volumen seleccionados.	47
Tabla 7:	Estadísticas de la regresión.....	48
Tabla 8:	Análisis de Varianza	48
Tabla 9:	Determinación del intercepto y coeficientes de la ecuación.	48
Tabla 10:	Ecuaciones y Coeficiente de Determinación.	49
Tabla 11:	Prueba estadística F.....	50
Tabla 12:	Prueba estadística t-Student.	51
Tabla 13:	Ecuaciones ponderadas seleccionadas.....	58
Tabla 14:	Índice de Furnival para la selección de la mejor ecuación.	60

Índice de figuras

	Página
Figura 1: Distribución natural de la caoba en América Central.....	5
Figura 2: Distribución natural de la caoba en América del Sur.....	6
Figura 3: Mapa de probabilidad de ocurrencia de caoba por el clima.	8
Figura 4: Mapa de ubicación de árboles de caoba evaluados en Ucayali.	32
Figura 5: Mediciones de diámetro a diferentes alturas.....	33
Figura 6: Secuencia metodológica para la estimación del volumen.....	34
Figura 7: Distribución de árboles por clase diamétrica.	42
Figura 8: Relación del volumen y dap de 103 árboles de caoba.	44
Figura 9: Relación del volumen y altura de fuste de 103 árboles de caoba.	44
Figura 10: Relación del volumen y dap^2 de 103 árboles de caoba.	45
Figura 11: Relación del volumen y dap^2h^2 de 103 árboles de caoba.....	45
Figura 12: Análisis de residuos de la ecuación 1.	52
Figura 13: Análisis de residuos de la ecuación 2.	53
Figura 14: Análisis de residuos de la ecuación 3.	53
Figura 15: Análisis de residuos de la ecuación 4.	53
Figura 16: Análisis de residuos para la ecuación 7.....	54
Figura 17: Análisis de residuos para la ecuación 8.....	54
Figura 18: Análisis de residuos para la ecuación 9.....	54
Figura 19: Análisis de residuos para la ecuación 11.....	55
Figura 20: Análisis de residuos para la ecuación 12.....	55
Figura 21: Análisis de residuos para la ecuación 14.....	55
Figura 22: Análisis de residuos para la ecuación 16.....	56
Figura 23: Análisis de residuos para la ecuación 19.....	56
Figura 24: Volumen real versus volumen estimado de árboles de caoba de Ucayali	61

Índice de anexos

Página

ANEXO 1 DATOS DE LOS ÁRBOLES DE CAOBA EVALUADOS.....	73
ANEXO 2 REGRESIÓN DEL MODELO 1.....	76
ANEXO 3 REGRESIÓN DEL MODELO 2.....	77
ANEXO 4 REGRESIÓN DEL MODELO 3.....	78
ANEXO 5 REGRESIÓN DEL MODELO 4.....	79
ANEXO 6 REGRESIÓN DEL MODELO 5.....	80
ANEXO 7 REGRESIÓN DEL MODELO 6.....	81
ANEXO 8 REGRESIÓN DEL MODELO 7.....	82
ANEXO 9 REGRESIÓN DEL MODELO 8.....	83
ANEXO 10 REGRESIÓN DEL MODELO 9.....	84
ANEXO 11 REGRESIÓN DEL MODELO 10.....	85
ANEXO 12 REGRESIÓN DEL MODELO 11.....	86
ANEXO 13 REGRESIÓN DEL MODELO 12.....	87
ANEXO 14 REGRESIÓN DEL MODELO 13.....	88
ANEXO 15 REGRESIÓN DEL MODELO 14.....	89
ANEXO 16 REGRESIÓN DEL MODELO 15.....	90
ANEXO 17 REGRESIÓN DEL MODELO 16.....	91
ANEXO 18 REGRESIÓN DEL MODELO 17.....	92
ANEXO 19 REGRESIÓN DEL MODELO 18.....	93
ANEXO 20 REGRESIÓN DEL MODELO 19.....	94
ANEXO 21 REGRESIÓN DEL MODELO 20.....	95
ANEXO 22 REGRESIÓN DEL MODELO 21.....	96
ANEXO 23 REGRESIÓN DEL MODELO 22.....	97
ANEXO 24 REGRESIÓN DEL MODELO 23.....	98
ANEXO 25 REGRESIÓN DEL MODELO 24.....	99
ANEXO 26 REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 3 ($1/K = 1/DAP^{1,5}$).....	100
ANEXO 27 REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 4 ($1/K = 1/(DAP^2 H)^{1,2}$).....	101
ANEXO 28 REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 11 ($1/K = 1/DAP^{1,5} H$).....	102
ANEXO 29 REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 12 ($1/K = 1/DAP^{1,5} H$).....	103
ANEXO 29 REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 16 ($1/K = 1/DAPH$).....	104

I. INTRODUCCIÓN

“La flora del Perú presenta más de veinte mil especies de plantas vasculares, de las cuales alrededor de seis mil son árboles. Gran parte de esta riqueza se ubica en los bosques tropicales amazónicos peruanos, los que abarcan 68 millones de hectáreas; es decir; más de la mitad del territorio nacional. Estos bosques albergan una gran variedad de especies maderables, entre ellas la caoba (*Swietenia macrophylla* King) que es una de las más valiosas por su calidad, durabilidad y trabajabilidad. En noviembre del 2002, en el marco de la Convención CITES, se aprobó la inclusión de la caoba en el Apéndice II” (MINAM, 2014).

Con el pasar de los años las poblaciones de caoba han disminuido, mientras que el precio de su madera va en aumento. Por ello, es de vital importancia que exista una mayor investigación que involucre directamente a esta especie, sobre temas que favorezcan a su manejo y conservación (Guillén, 2014). Una manera de contribuir con ello es través del desarrollo de técnicas más precisas para estimar el volumen de árboles de caoba en pie, ya que en nuestro país se calculan los volúmenes de árboles individuales -para todas las especies- con la fórmula reconocida por la autoridad forestal: $V=AB*HF*F$ (MINAM, 2015), lo que puede generar una subestimación o sobreestimación del volumen real de la caoba, influenciando así en el rendimiento de los diversos productos que pueden obtenerse del fuste.

Trincado, et al. (1997) mencionan que la estimación de volúmenes comerciales de árboles en pie es uno de los problemas más importantes en dendrometría forestal, ya que resulta impracticable medir directamente el volumen de cada árbol de un rodal; sin embargo, éste volumen puede ser estimado (con una considerada precisión) mediante el empleo de ecuaciones de volumen. Las ecuaciones de volumen son utilizadas para estimar el volumen de un árbol en función de alguna de sus características fácilmente medibles, por ejemplo: diámetro a la altura del pecho y altura del fuste; ellas se obtienen por medio de un análisis de regresión. En el mundo, este tipo de ecuaciones son actualmente más utilizadas que las tablas de volumen tradicionales.

En la presente investigación se utilizaron los datos dasométricos de árboles de caoba evaluados por el proyecto UNALM-ITTO PD 251/03 Rev. 3(F) “Evaluación de las existencias comerciales y estrategia para el manejo sostenible de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el Perú” en el año 2006 en el departamento de Ucayali.

El objetivo general es estimar con precisión el volumen de los árboles en pie de caoba ubicados en el departamento de Ucayali a partir de variables de fácil medición en campo. Asimismo, los objetivos específicos son: elaborar, evaluar y seleccionar la ecuación más confiable para la estimación del volumen de árboles en pie de caoba del área de estudio mencionada.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. CARACTERÍSTICAS DE LA CAOBA

1.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Vargas (1987), describe la taxonomía de esta especie de la siguiente manera:

División	:	Angiosperma
Clase	:	Magnoliopsida (Dicotiledónea)
Sub. Clase	:	Arquiclamidea
Orden	:	Sapindales
Sub. Orden	:	Rutineae
Familia	:	Meliaceae
Género	:	Swietenia
Especie	:	Macrophylla
Nombre Científico	:	<i>Swietenia macrophylla</i> King

Nombres Comerciales: Cárdenas y Vásquez, citados por Escobar (2015) y Vásquez (2011) mencionan los siguientes nombres comunes para diferentes países: en Bolivia (crura, mara), en Brasil (mogno, aguano, araputanga), en Colombia (caoba americana, cedro carmesí, cedro espinoso), en Ecuador (ahuano, caoba, almendro), en Francia (acajou d'amerique, swiétenie), en Italia (mogano), en México (caoba), en Puerto Rico (caoba de Honduras), en República Dominicana (mahogany), en USA (genuine mahogany, mahogany), en Venezuela (caoba negra, caobo, oruba, orura), en Tailandia (mahon).

1.2. DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Según Reynel et al. (2003) la descripción de la caoba es la siguiente:

Árbol de 80-200 cm de diámetro y 20-35 m de alto, con fuste cilíndrico, la ramificación desde el segundo tercio, la base del fuste usualmente con raíces tablares de hasta 1,5 m de alto.

Corteza externa agrietada, color marrón claro a rojizo, con ritidoma que se desprende en placas alargadas.

Corteza interna homogénea a fibrosa, color rosado blanquecino, con sabor amargo y astringente.

Ramitas terminales con sección circular, color castaño claro, menudamente lenticeladas, glabras. Presentan cada cierto tramo cicatrices congestionadas de la caída de hojas.

Hojas compuestas, paripinnadas, alternas, dispuestas en espiral, con tendencia a agruparse en los extremos de las ramitas, de 16-35 cm de longitud, el raquis delgado, los folíolos 4-6 pares, opuestos o sub opuestos, ovados, asimétricos, de unos 9-13 cm de longitud y 3-4 cm de ancho, el ápice agudo y falcado, la base obtusa o aguda, marcadamente asimétrica, el borde entero, los nervios secundarios 8-11 pares, prominulos en ambas caras, la nervación terciaria reticulada, los folíolos glabros.

Inflorescencias en panículas de 15-25 cm de longitud. Flores pequeñas y unisexuales por atrofia de uno de los sexos, de 8-10 mm de longitud, con cáliz y corola presentes, el pedicelo de 3-4 mm de longitud, el cáliz cupuliforme de 2-3 mm de longitud, los sépalos 5, libres hacia el ápice, los pétalos 5, libres, de 5-6 mm de longitud, elípticos, glabros, el androceo con un tubo estaminal en el ápice del cual hay 5 estambres o estaminodios, el gineceo con el ovario globoso, el estilo columnar y el estigma discoide.

Frutos cápsulas ovoides, erectas, grandes, de unos 15-20 cm de longitud y 6-8 cm de diámetro; abren desde la base hacia el ápice en 5 valvas leñosas, con la superficie casi lisa, las semillas aladas, 45-70 en cada fruto, de 7,5-9 cm de longitud y 2-2,5 cm de ancho, color castaño claro dispuestas en una columna interior (columela).

En cuanto a la fenología y dispersión, las flores de esta familia son visitadas por abejas pequeñas y mariposas, pero aún no está claro si estos insectos son los legítimos polinizadores.

1.3. DISTRIBUCIÓN ECOLÓGICA Y GEOGRÁFICA

El área de distribución natural de la caoba se extiende desde México, a los 23° N siguiendo la franja costera del Atlántico hacia América del Sur, en donde continúa en un amplio arco desde Venezuela, a través de las regiones amazónicas de Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia y Brasil, hasta los 18° S (Lamb, 1966; UNALM-ITTO, 2009).



Figura 1: Distribución natural de la caoba en América Central

FUENTE: Lamb, 1966.

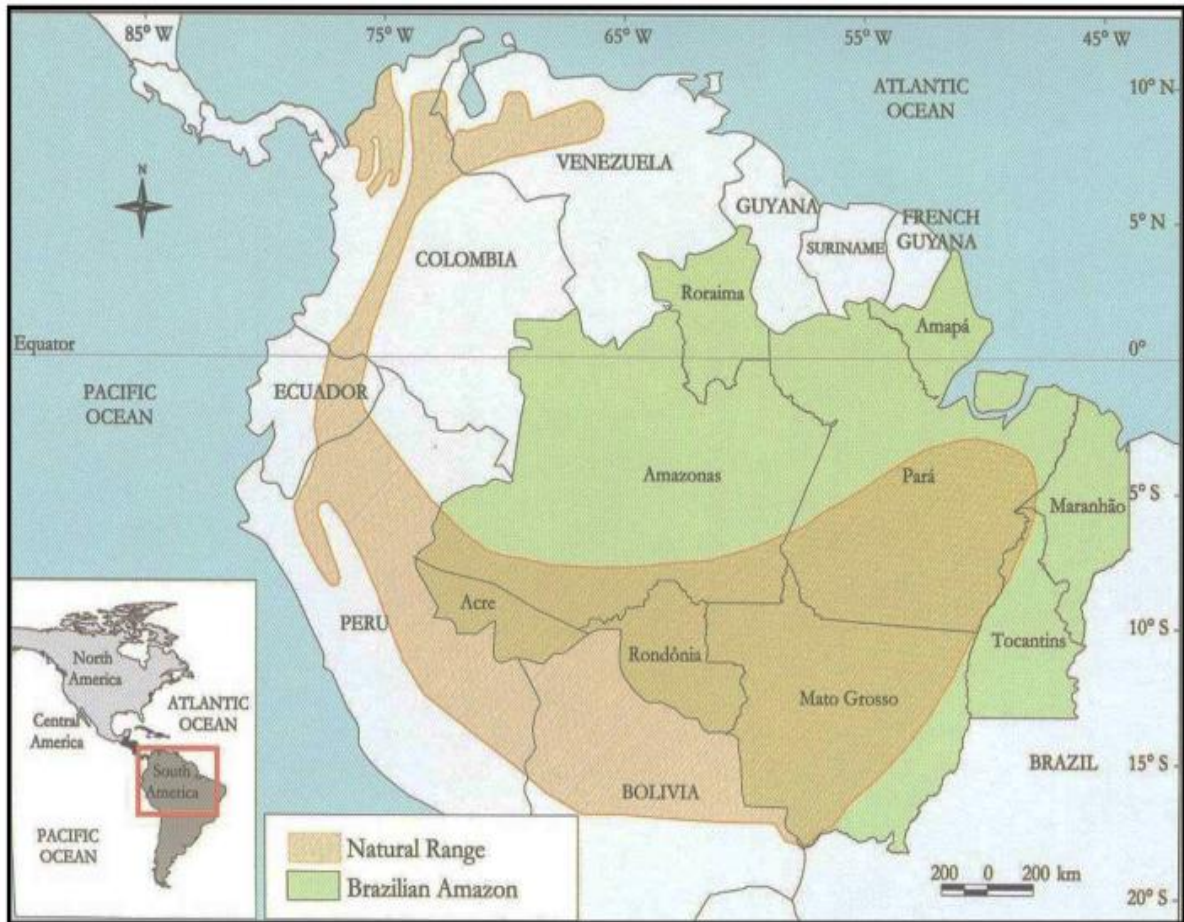


Figura 2: Distribución natural de la caoba en América del Sur.

FUENTE: Lamb, 1966.

Barrena y Vargas (2004) señalan que la caoba se encuentra distribuida en las Zonas de Vida bosque seco Tropical (bs-T) y bosque húmedo Tropical (bh-T), así como en las formaciones correspondientes de la franja subtropical (bs-S y bh-S) y en las zonas transicionales entre ellas. Además, Lombardi et al. (2013), expresan que la distribución ecológica generalmente corresponde a los bosques clasificados como "tropical seco", con temperatura anual promedio igual o superior a 24°C, con precipitaciones que van desde los 1000 mm/año hasta los 2000 mm/año y con un coeficiente de evapotranspiración de 1,0 - 2,0. También crece en zonas húmedas y subtropicales, en altitudes que van desde el nivel del mar en América Central hasta 1 400 m en las estribaciones andinas de Ecuador, Perú y Bolivia.

La caoba crece naturalmente en una gama muy amplia de tipos de suelo, incluidos los que resultan de rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, y los que son de origen de aluviones volcánicos (Mayhew y Newton, citado por UNALM-ITTO, 2009). Además, Reynel et al. (2013) mencionan que esta especie también crece en suelos ligeros, franco a arenosos, de buena fertilidad, bien drenados, con pedregosidad baja a media.

Cárdenas et al., citado por Vásquez (2011), mencionan que esta especie se presenta habitualmente en los claros, así como en bosques secundarios tardíos. En el sotobosque, las semillas germinan rápidamente al inicio de la época lluviosa, pero en ambientes más secos, como claros del bosque y áreas intervenidas, la germinación normalmente es lenta.

Barrena y Vargas (2004) expresan que en el Perú, la caoba crece en todos los departamentos de la región selvática, zonas cuya temperatura anual promedio se encuentra en el rango de 23°C a 28°C, con una temperatura media del mes más frío entre 11°C y 22°C y la del mes más cálido entre 22°C y 30°C. Además, Trigoso, et a. (2002) manifiestan que el rango de distribución natural de la caoba en el Perú comprende el ámbito de 9 regiones del país; estas son, de norte a sur, las siguientes: Loreto, Amazonas, San Martín, Ucayali, Huánuco, Junín, Cuzco, Madre de Dios y Puno.

En la Figura 3 se observa la distribución natural de la especie en el Perú, señalando la probabilidad de encontrar individuos de caoba (Lombardi y Vargas, 2006).

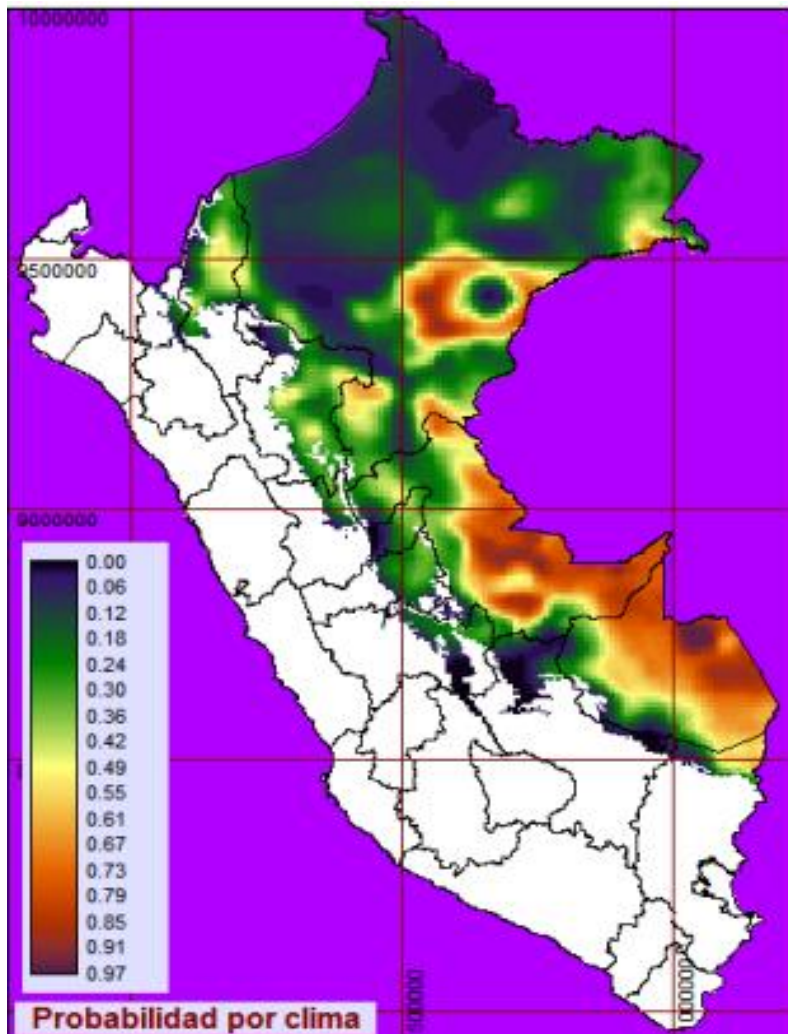


Figura 3: Mapa de probabilidad de ocurrencia de caoba por el clima.

FUENTE: Lombardi y Vargas (2006)

1.4. CARACTERÍSTICAS, PROPIEDADES Y USO DE LA MADERA

La madera de caoba es considerada por muchos como la mejor madera para ebanistería a nivel mundial. Su duramen tiene al corte un color rosado que al secar se convierte en pardo rojizo a pardo dorado. La albura de 2,5 a 5,0 cm de grosor, de mucho menor valor, es amarillenta. La textura es de fina a medianamente gruesa, con grano recto entrecruzado, presenta un veteado muy atractivo y lustroso, sobretodo en el corte radial. El duramen es de “resistente” a “muy resistente” a la pudrición blanca y “muy resistente” a la pudrición marrón. No es resistente a los perforadores marinos y su durabilidad natural es alta (Barrena y Vargas, 2004).

Según la CPM (2008), la caoba presenta las siguientes propiedades físicas:

- Densidad Básica: 0,43 gr/cm³
- Contracción Volumétrica: 8,80%
- Relación T/R: 1,70
- Contracción Tangencial: 5,54%
- Contracción Radial: 3,17%

La madera de la caoba es de fácil aserrío, de secado natural moderado y de buen comportamiento al secado artificial con un programa severo. Se usa principalmente en ebanistería de lujo, instrumentos musicales, astilleros (botes, barcos), decoración de interiores, escultura, tallado, arcos, molduras, moldeado, chapas, entre otros (Vásquez, 2011).

1.5. SITUACIÓN CITES

La CITES (Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna Silvestres) es un acuerdo internacional concertado entre los Estados. Tiene por finalidad velar porque el comercio internacional de especímenes de animales y plantas silvestres no constituya una amenaza para su supervivencia (Barrena y Vargas, 2004).

En el año 2001 el Perú decidió incluir a la caoba en el Apéndice III de CITES, lo que significó que la caoba que se comercializaba a nivel nacional (trozas, madera aserrada y láminas de chapa) debía ir acompañada de permisos de exportación. (OIMT, 2004).

En el mes de noviembre de 2002, en la 12^o Conferencia de las Partes de la Convención sobre CITES realizada en Santiago de Chile, se aprobó una decisión para transferir esta especie del Apéndice III al Apéndice II, lo que significaba que la supervivencia de la especie estaba amenazada y era necesario tomar medidas correctivas para evitar la extinción de las poblaciones silvestres. Esta restricción entró en vigor en el mes de noviembre de 2003, estipulando que las exportaciones sólo son posibles si la Autoridad Científica para Flora Maderable del Perú emite un pronunciamiento sobre la situación de la especie en el campo, que en este caso fue ejercida por la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) a través de su Facultad de Ciencias Forestales (FCF). Sin embargo, la FCF indicó que no podía emitir los mencionados pronunciamientos porque no existía información suficientemente confiable sobre el estado actual de las poblaciones naturales de caoba. Es

así, que la UNALM, en el año 2006, con el apoyo de la Organización Internacional de las Maderas Tropicales (OIMT), empezó a ejecutar un proyecto para determinar el estado de las poblaciones de esta especie y verificar la precisión del modelo de distribución natural elaborado por la FCF (Lombardi y Huerta, 2006).

Así, el proyecto propuesto se denominó: UNALM-ITTO PD 251/03 Rev. 3(F) “Evaluación de las existencias comerciales y estrategia para el manejo sostenible de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el Perú”. Este proyecto estaba orientado a conocer el estado de las poblaciones de caoba en el país y a construir una base de datos que permita hacer el seguimiento a las unidades forestales que actualmente están explotando la especie y conocer cuáles son las especies asociadas al desarrollo y crecimiento de los individuos de la caoba. En este sentido, los resultados se orientaron al plan nacional de trabajo futuro de la especie para asegurar su supervivencia. (UNALM-ITTO, 2009).

2. ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE LOS ÁRBOLES

2.1. MUESTRA

Prodan, et al. (1997) mencionan que dado que las poblaciones forestales son por lo general muy extensas y de difícil acceso, su descripción se basa en una pequeña muestra de árboles, seleccionados de modo que representen a toda la población. Estas unidades muestrales deben ser probabilísticas, por lo que deben cumplir las siguientes condiciones:

- Se asigna a cada árbol de la población una determinada probabilidad de ser seleccionado en una unidad muestral.
- Se localizan aleatoriamente puntos de muestreo, de modo que cualquier lugar de la superficie donde se distribuye la población de árboles tenga la misma probabilidad de ser elegido.
- Todos los árboles de la población son susceptibles de ser seleccionados en cada punto de muestreo instalado, con la probabilidad pre asignado.

Cancino (2006) señala que en la captura de información en rodales es habitual trazar numerosas unidades de muestreo, las que después deben procesarse en conjunto para obtener valores promedio por unidad de superficie de rodal. La información se recopila sobre el terreno en unidades muestrales cuyo tamaño, forma y distribución se han definido

de antemano; posteriormente, las variables que están relacionadas con la superficie de la unidad muestral, se expanden para estimar el valor por unidad de superficie (hectárea) del rodal. Tal operación se realiza mediante el factor de expansión, cuyo valor es función del tamaño de la unidad de muestreo

2.2. MEDICIÓN DE LOS ÁRBOLES EN CAMPO

2.2.1. MEDICIÓN DEL DIÁMETRO:

Prodan, et al. (1997) expresan que es la operación más común y simple de medir y se trata de la variable que más incide en la determinación del volumen. En árboles en pié, el diámetro representativo es el que se encuentra 1,30 m desde el nivel del suelo y por su altura de medición se lo llama diámetro a la altura del pecho (dap).

García (1995) menciona que los instrumentos más usados para medir el dap son la forcípula y la huincha de diámetro (también conocida como cinta diamétrica). Además, Prodan, et al. (1997) expresan que los diámetros a alturas superiores se miden trepando el árbol, con instrumentos montados en varas, o con diversos tipos de dendrómetros ópticos. Otros instrumentos que también se utilizan son: Relascopio de Bitterlich, forcípula finlandesa, vara Biltmore.

2.2.2. MEDICIÓN DE LA ALTURA:

La altura del árbol es, después del diámetro, un parámetro fundamental a evaluar en los inventarios forestales. Su medición es importante, puesto que ella es una de las tres variables, junto al diámetro y forma del fuste, que se utilizan en la estimación del volumen de un árbol o de un rodal. Además refleja la calidad del sitio (Barrena y Llerena, 1988). El MINAM (2015) expresa que para árboles, la altura puede ser de dos clases: altura total y altura de fuste. La altura total es la medida considerada desde el suelo hasta la cima de su copa o corona, y la altura de fuste es la medida del árbol desde el suelo hasta el inicio de la ramificación, y se utiliza principalmente para estimar el volumen maderable, biomasa y carbono del vuelo.

Las alturas de hasta 10 a 15 m se miden de preferencia con varas telescópicas. Para mayores alturas se usan clinómetros (instrumentos que miden ángulos) o hipsómetros (instrumentos especializados que indican la altura). Algunos hipsómetros (Christen, Merrit) emplean semejanza de triángulos, pero los más usados en la actualidad se basan en principios trigonométricos (García, 1995).

Cancino (2006) expresan que para realizar la medición, el operario se posiciona a cierta distancia del árbol, apunta con el instrumento a la base y a otro punto de interés en el árbol, y realiza la lectura en la escala del instrumento en cada oportunidad. Considerando los valores sobre la horizontal como positivos y aquellos bajo la horizontal como negativos, el valor absoluto de la diferencia entre ambas mediciones entrega la altura buscada. Barrena y Llerena (1988) explican que la causa principal de error en la medición de alturas es la imposibilidad de determinar la posición exacta del extremo superior del árbol.

Además de los instrumentos mencionados, considerados clásicos en la medición forestal, Prodan, et al. (1997) mencionan la aparición de varios instrumentos para la medición de diámetros y alturas, tanto directamente como a distancia, con una tecnología muy avanzada que le provee de otras capacidades en el proceso de captura y procesamiento de los datos en el terreno. Entre los más importantes están: la forcípula Mantax Computer, el hipsómetro Vertex y el Criterion.

2.3. CÁLCULO DE VOLUMEN

Da Cunha y Guimaraes (2009) expresan que el volumen es la variable que indica en unidades de metro cúbico (m^3) la cantidad de madera contenida en los árboles. Prodan, et al. (1997) señalan que el contenido volumétrico se considera en función de las variables dap, altura total o altura de fuste hasta su bifurcación, y alguna expresión de la forma del fuste. Además, Malleux (1982) afirma que el volumen es en definitiva, el resultado más importante del inventario forestal, como indicador del potencial o capacidad de producción del bosque.

Salazar (1989) menciona que la cuantificación de madera de un árbol puede ser a través de su volumen total o volumen comercial. El volumen total con o sin corteza se refiere al volumen total del fuste. Si el cálculo se hace en árboles en pie, el volumen se toma desde el nivel del suelo hacia el ápice terminal del árbol, o sea se considera la altura total. Si el árbol ha sido cortado, el volumen total se toma desde el punto de corte hacia el ápice terminal del árbol, donde se debe excluir las secciones podridas del árbol. El volumen comercial con o sin corteza se refiere a la sección del volumen del fuste que puede ser utilizada para aserrar, moler o desenrollar. Se puede determinar en árboles cortados o en pie y se considera desde el punto de corte hasta el diámetro menor que se defina como comercial. Sin embargo, otros autores Kometter y Maraví (2007) señalan que el volumen comercial es el volumen de

madera total estimado para el árbol en pie y calculado a partir del dap y la altura comercial calculada hasta la base de la copa, medida en metros cuando el árbol está en pie.

Malleux y Montenegro (1971) manifiestan que la determinación del volumen de un objeto implica la medida de tres dimensiones. Loetsch, et al. (1973) afirma que, después del diámetro y la altura, la forma es la tercera variable que determina el volumen de un árbol. Lojan (1966) menciona que la forma se debe a la disminución del diámetro con el aumento de la altura, a lo que se denomina ahusamiento, y para valorarlo se busca la relación del volumen del árbol con el volumen de algún sólido geométrico. Los tratados de dendrometría, asimilan generalmente la forma de los árboles a cuatro sólidos de revolución: el cilindro, el paraboloides, el cono y el neloide, pero son pocos los árboles que poseen la forma semejante a los sólidos geométricos mencionados, lo cual ocurre con más frecuencia en especies tropicales que en especies coníferas de zonas templadas.

Barrena (1990) señala que los cambios en la forma están en función del sitio, de la densidad del rodal, la herencia, la base del fuste y la posición sociológica de un individuo. Además señala que las intervenciones silviculturales como la poda y el raleo pueden modificar la forma del individuo.

Cancino (2006) menciona que tradicionalmente se reconocen cuatro líneas en el estudio de la forma. Tres de ellas se basan en relaciones simples: a) factores de forma, que se derivan del cociente entre volúmenes; b) cocientes de forma, obtenidos del cociente entre diámetros; y c) puntos de forma, que corresponden al cociente entre alturas; otra línea se basa en funciones más complejas como curvas, fórmulas y tablas de ahusamiento.

Según FAO (1981), la estimación directa de volúmenes individuales de árboles puede hacerse de tres maneras:

- Con fórmulas geométricas para volúmenes de sólidos simples y gráficos.
- Con relaciones cuantitativas entre los parámetros medidos y los volúmenes, como son ecuaciones establecidas por análisis de regresión.
- Volumen entre dos puntos cualesquiera del fuste, o volumen hasta cualquier índice de utilización.

Además, Cuñachi (s.f.) menciona que el cálculo del volumen de los árboles enteros, trozas de una pieza o de un lote de piezas se puede realizar mediante fórmulas conocidas. Las comúnmente empleadas son las fórmulas Smalian, Doyle, Huber y Newton.

2.4. ECUACIONES DE VOLUMEN

Chechi, et al., citado por Ruiz (2007), mencionan que la estimación del volumen de un árbol individual es un problema relevante en dendrometría. Así mismo, Cancino (2006) manifiesta que la determinación directa del volumen en árboles individuales es una tarea laboriosa que consume habitualmente mucho tiempo, pero resalta que es necesario para el desarrollo de relaciones funcionales de volumen.

Da Cunha y Guimaraes (2009) expresan que una forma de acceder al conocimiento del volumen de madera de un rodal es a través del conocimiento del volumen de sus árboles individuales y una herramienta para determinar ese volumen son los modelos matemáticos de regresión por medio de las tablas de volumen.

La tabla de volumen es una herramienta importante a la hora de cuantificar la producción y rendimiento de una superficie boscosa y/o rodal, en cuanto al volumen de madera existente para una o más especies; por lo tanto, es útil para valorar económicamente un área boscosa (Villaruel, 1994). Sin embargo, hoy en día estas han sido reemplazadas por las ecuaciones de volumen, es decir, por modelos matemáticos capaces de representar el volumen medio de madera por árbol a partir de las variables independientes (Da Cunha y Guimaraes, 2009). De la misma manera, Loetsch et al. (1973) mencionan que las ecuaciones de volumen son cada vez más populares, pues para calcular el volumen de una masa forestal es solamente necesaria una ecuación y ya no una tabla completa. FAO (1974) también emplea la expresión “ecuaciones de volumen” en vez de la más común “tabla de volumen” para indicar que solo ecuaciones dan el volumen de un árbol como una función de las características (comúnmente diámetros y alturas) y derivadas de regresiones estadísticas.

Bautista (2000) resalta que la ventaja del uso de las ecuaciones de volumen en el inventario forestal es evidente: porque permite, a partir de mediciones detalladas en un número limitado de árboles juiciosamente seleccionados dentro de la superficie forestal (“árboles muestra”), la estimación objetiva del volumen de un número de árboles mucho más grande en las unidades de muestreo, y finalmente la estimación de los volúmenes totales y medios dentro de la superficie inventariada. Así mismo, Mora y Gómez (2003) afirman que las

ecuaciones de volumen son herramientas de vital importancia para el profesional forestal, porque le permiten agilizar el proceso de la toma de decisiones, ya que facilitan el procedimiento y sistematización de la información colectada, reduciendo el tiempo necesario para su análisis y la obtención de resultados.

Según Philip (1994), la construcción de una ecuación de volumen consiste en tres etapas:

- 1) Medición de los volúmenes individuales de árboles seleccionados que constituyen una muestra representativa de la población.
- 2) Establecimiento de las relaciones entre las mediciones tomadas sobre los árboles y volúmenes.
- 3) Elección del mejor modelo y verificación de la precisión de la ecuación de volumen elaborada.

Lojan (1966) expresa que mucho trabajo se ha concentrado en la búsqueda de una ecuación de estimación de volúmenes a base del diámetro y la altura principalmente, que permita cubicar los árboles con mínimo error. Esto se ha conseguido estudiando las relaciones que guardan entre sí las diferentes variables que se miden en un árbol. Actualmente existen varias ecuaciones de estimación para el volumen de los árboles, pero no se puede adoptar ninguna para un bosque sin un estudio previo de exactitud o proximidad que hay entre los datos reales y los datos obtenidos con la ecuación, esto implica que se busque una ecuación para cada bosque. Para los bosques tropicales existen pocas ecuaciones conocidas y estas han sido elaboradas por diferentes métodos.

Loetsch, et al. (1973) realizaron una recopilación de los modelos de ecuaciones de volumen más usadas con sus respectivos autores, la cual se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Modelos de ecuaciones más usados.

VARIABLES INDEPENDIENTES	AUTOR	MODELO
d	Kopezky-Gehrhardt Dissescu-Meyer Hohenadl-Krenn Berhout Husch 1963 Brenac	$V=b_0+b_1d^2$ $V=b_0d+b_1d^2$ $V=b_0+b_1d+b_2d^2$ $V=b_0+d^b$ $\log V=b_0+b_1\log d$ $\log V=b_0+b_1\log d+b_2(1/d)$
d, h	Spurr, 1951 Spurr, 1952 Ogaya Stoate Naslund Meyer (Comprensiva) Meyer (Modificada) Takata Shumacher-Hall Variable Logarítmica Modificada Instituto de Investigaciones Forestales (Alemania)	$V=b_1d^2h$ $V=b_0+b_1d^2h$ $V=d^2(b_0+b_1h)$ $V=b_0+b_1d^2+b_2d^2h+b_3h$ $V=b_1d^2+b_2d^2h+b_3dh^2+b_4h^2$ $V=b_0+b_1d+b_2d^2+b_3dh+b_4d^2h+b_5h$ $V=b_0+b_1d+b_2d^2+b_3dh+b_4d^2h$ $V=d^2h/(b_0+b_1d)$ $\log V=b_0+b_1\log d+b_2\log h$ $\log V=b_0+b_1\log(d^2h)$ $\log V=b_0+b_1\log d+b_2\log^2 d+b_3\log h+b_4\log^2 h$
d, h, q, d_i, d_{0.3h}, g	Spurr Shrorr-CUT Var. Combinada Schiffel Ogaya Pollanschutz Spurr Diamétrica Spurr Logarítmica	$V=b_0+b_1qd^2h$ $V=b_0+b_1q+b_2d^2h+b_3qd^2h$ $V=d^2h(b_0+b_1q+b_2(1/qh))$ $V=b_0+b_1d_{0.3h}dh$ $V=\pi/4(b_0d^2h+b_1dd_{0.3h}+b_2h^2)$ $\log V=b_0+b_1\log d+b_2\log h+b_3\log d_i$ $\log V=b_0+b_1\log(d,dh)$

FUENTE: Loetsch et al. (1973).

V = Volumen

d_i = Diámetro sobre el nivel del suelo

d = Diámetro a la altura del pecho

d_{0.3h} = Diámetros a un tercio del fuste

q = Cociente de Forma

hc = Altura de copa

g = Área basal a la altura del pecho

h = Altura de fuste

2.5. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística para investigar y modelar la relación entre variables. Son numerosas las aplicaciones de la regresión, y las hay casi en cualquier campo, incluyendo ingeniería, ciencias físicas y químicas, economía, administración, ciencias biológicas y las ciencias sociales. De hecho, puede ser que el análisis de regresión sea la técnica estadística más usada (Montgomery, et al., 2006).

Chatterjee y Price (1977) afirman que esta técnica proporciona un método sencillo para el establecimiento de una relación funcional entre las variables. Las relaciones son expresadas en una ecuación, donde existe una variable dependiente (y) y una o más variables independientes (x_1, x_2, \dots, x_n), que presentan la siguiente forma:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + e$$

Donde b_0 es el intercepto o constante del modelo, b_1 es la estimación de la pendiente en x_1 . El intercepto b_0 es el valor promedio de “ y ” cuando “ x ” es cero; b_i mide el cambio en el valor promedio de “ y ” como el resultado de un cambio unitario en “ x_i ”; “ e ” es el residual del modelo.

Una ecuación de regresión que contiene sólo una variable independiente se denomina ecuación de regresión simple, mientras que una ecuación que contiene más de una variable independiente se conoce como ecuación de regresión múltiple (Mendiburu, s.f.).

FAO (1981) manifiesta que el análisis de regresión lineal basado en el método de los mínimos cuadrados es una técnica para ajustar ecuaciones predictivas a datos originales, que sigue el principio de minimizar la suma de los cuadrados de las desviaciones entre los puntos y una línea recta. Hanke y Wichern (2006) mencionan que el hecho de ajustar un modelo por mínimos cuadrados no completa el estudio de la regresión. Las inferencias se pueden hacer cuando los supuestos del modelo se cumplen de manera adecuada; por ello, es esencial verificar cuidadosamente los datos. Los supuestos que se deben cumplir, para que los parámetros de la ecuación ajustada sean los más correctos en un sentido estadístico, son:

- **Linealidad:** la relación entre la variable dependiente y la(s) variable(s) independiente(s) es lineal.
- **Homocedasticidad:** los residuos tienen varianza constante.
- **Normalidad:** los residuos presentan una distribución normal.
- **Independencia:** Los valores de la variable “y” son estadísticamente independientes.

Cailliez (1980) afirma que el análisis de regresión es hoy en día el método más utilizado para desarrollar ecuaciones de volumen, pues el inconveniente de los cálculos ha disminuido con el desarrollo de las computadoras.

Philip, citado por Barrena, et al. (1986), menciona que la utilización del análisis de regresión en la construcción de ecuaciones de volumen presenta las siguientes ventajas:

- Proporciona un estimado de la precisión o predicción de estimación.
- Se cuenta con un método objetivo de elección entre diferentes modelos matemáticos.
- Se necesitan pocos datos para alcanzar una precisión deseada.

Philip, Bouchon y Cunia, citados por Barrena (1988) mencionan que para que la aplicación del método de los mínimos cuadrados sea correcta, se debe cumplir con las siguientes hipótesis:

- Que la muestra sea obtenida al azar.
- Que la población tenga una distribución normal.
- Que la varianza sea homogénea.

Los mismos autores indican que las poblaciones de árboles en bosques naturales no cumplen con estas hipótesis y acotan que la varianza del volumen de los árboles grandes es mucho mayor que la de los árboles pequeños, porque depende del valor del dap elevado al cuadrado, multiplicado por la altura y todo elevado al cuadrado. Así mismo, Chatterjee y Price (1977) observa que ésta característica puede acarrear inferencias estadísticas erróneas porque no se cumple con la hipótesis de homogeneidad de varianzas (homocedasticidad).

Cailliez (1980) expresa que en la elección del modelo de regresión, se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- La simplicidad del modelo (menor cantidad de coeficientes).
- Decidir si la regresión debe ser ponderada o no ponderada (se debe ponderar cuando la varianza del volumen depende de las variables independientes).

Barrena, et al. (1986), Gujarati (1992) y Escobar (2015) mencionan que para la elección de la mejor ecuación de volumen, el criterio de selección debe hacerse lo más objetivamente posible. Para ello las ecuaciones deben clasificarse y analizarse en base a los siguientes criterios:

1) **Coefficiente de Determinación (R^2)**

Uriel (2013) expresa que el coeficiente de determinación es una medida de la bondad de ajuste, que permite decidir si el ajuste lineal es suficiente o se deben buscar modelos alternativos. Hanke y Wichern (2006) mencionan que este valor es muy importante en cualquier análisis de regresión, ya que mide el porcentaje de variabilidad en “y” que puede explicarse a través del conocimiento de la variable “x”; y además tiene la ventaja de ser muy útil, por lo que es una de las estadísticas más consultadas en el análisis de regresión.

El R^2 se define como sigue (Uriel, 2013):

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT}$$

Dónde:

SCE: Suma de Cuadrados del Error

SCT: Suma de Cuadrados Total

Vélez (2003) menciona que los valores de R^2 se encuentran entre 0 y 1. Si todos los puntos observados estuvieran en la línea de regresión, R^2 sería igual a 1, lo que significaría que hay un ajuste perfecto. Por lo tanto un R^2 cercano a 1 indica buen ajuste y un R^2 cercano a cero indica un mal ajuste.

Vilar (2006) manifiesta también que el R^2 mide la proporción de variabilidad total de la variable dependiente respecto a su media que es explicada por el modelo de regresión. Acuña (2010) manifiesta que un R^2 mayor a 0,7 indica una buena asociación lineal entre las variables. Además, Alvarado y Obagi (2008) recomiendan que el R^2 sea mayor a 0,64 para que la asociación se considere aceptable, y que el mínimo valor para aceptar una ecuación en el estudio de ciencias exactas es de 0,75.

Rojo (2007) expresa que a diferencia de la varianza residual (otra manera de medir la bondad de ajuste), el coeficiente de determinación es adimensional; esto quiere decir que no está afectado por transformaciones lineales de las variables; por ello, si cambiamos las unidades de medida, el coeficiente de determinación permanecerá invariante.

Martínez (2005) concuerda con que el R^2 es una medida adimensional, de fácil cálculo e interpretación; pero que debido a su recorrido acotado entre cero y uno, conduce a una profusa utilización de la misma, con interpretaciones abusivas en unos casos y erróneas en otros. Por ello, sin tratar de mermar la importancia de este coeficiente, el R^2 debe tomarse como una primera medida, a completar con otras, para evaluar el modelo lineal de regresión ajustado y obtener conclusiones válidas sobre su grado de ajuste al conjunto de observaciones, ya que su exclusiva consideración puede, en muchas ocasiones, conducir a errores importantes en los análisis de regresión.

2) Prueba de significancia del conjunto de variables (prueba estadística Fisher).

Mendiburu (s.f.) menciona que la prueba de significancia de Fisher (F), permite determinar si la regresión lineal simple es globalmente significativa. Según Vélez (2003), el valor F se obtiene de la siguiente expresión:

$$F = \frac{CMR}{CME}$$

Dónde:

CMR: Cuadrado Medio de la Regresión

CME: Cuadrado Medio del Error

Vélez (2003) expresa que el valor de F es una comparación entre la variabilidad dada por el modelo y la variabilidad dada por los errores. Asimismo, Da Cunha y Guimaraes (2009) expresan que cuanto mayor es la variación explicada por el modelo y menor es la variación por el error, mayor será el valor de F indicando que el modelo tiene buen ajuste.

Mendiburu (s.f.) expresa que en la prueba estadística “F” se evalúan las siguientes hipótesis:

$H_0: \beta_1 = 0$. No existe una regresión lineal entre “x” e “y”.

$H_1: \beta_1 \neq 0$. Existe regresión lineal de “y” en función de “x”.

Si el valor F calculado es mayor o igual al valor tabular; entonces, se rechaza la Hipótesis nula (H_0), caso contrario se acepta.

Uriel (2013) menciona que con la utilización de ordenadores, el contraste de hipótesis puede contemplarse desde una perspectiva más racional. Así, los programas del ordenador suele ofrecer, junto al estadístico F, un contraste de probabilidad. Esta probabilidad, a la cual se le denomina p-valor o “*p-value*” también es conocida como nivel de significación crítico o exacto. Gujarati (1992) lo define como el menor nivel de significación al que se puede rechazar una hipótesis planteada cuando es verdadera. Vélez (2003) señala que el p-valor es la probabilidad de que el valor de F ocurra por azar y no porque las variables están relacionadas linealmente entre sí.

Romero (2012) menciona que el p-valor proporciona el grado de credibilidad de la hipótesis nula: si el p-valor fuese “muy pequeño” (inferior a 0,001), significaría que la hipótesis nula es del todo increíble (en base a las observaciones obtenidas), y por tanto la descartaríamos; si el p-valor oscilase entre 0,05 y 0,001 significaría que hay fuertes evidencias en contra de la hipótesis nula, por lo que la rechazaríamos o no en función del valor que hubiésemos asignado (a priori). Finalmente, si el p-valor p es “grande” (superior a 0,05), no habría motivos suficientes como para descartar la hipótesis nula, por lo que la tomaríamos como cierta.

3) Prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión (T- Student)

En un análisis de regresión, se halla el intercepto y el coeficiente estimado. Vélez (2003) menciona que lo que interesa saber es si los coeficientes son estadísticamente diferentes de cero, y una manera de determinarlo es a través de del estadístico t-Student (t). Uriel (2013) expresa que en una regresión lineal, el estadístico t (t calculada) se determina de la siguiente manera:

$$t = \frac{b_1 - \mu}{SE(b_1)}$$

Como nos interesa examinar la hipótesis de que el coeficiente es cero, de la anterior expresión definimos μ igual a cero, b_1 es el estimado del coeficiente y en el denominador se incluye el error típico o estándar ($SE(b_1)$) del coeficiente. De esta manera, el estadístico t evalúa las siguientes hipótesis:

$H_0: \beta_1 = 0$. El coeficiente es estadísticamente igual a cero.

$H_1: \beta_1 \neq 0$. El coeficiente es estadísticamente diferente a cero.

Si el valor de t calculado es mayor o igual al valor tabular; entonces, se rechaza la Hipótesis nula (H_0), caso contrario se acepta.

Vélez (2003) menciona que es también importante evaluar el “p-valor” de este estadístico, ya que mide la probabilidad de que el valor obtenido para t ocurra por azar, dentro de una situación en la que al menos un coeficiente sea igual a cero. Asimismo, Uriel (2013) expresa que la determinación del p-valor es la operación inversa de encontrar el valor en las tablas estadísticas para un determinado nivel de significación. Por lo que, se debe proponer un nivel de significación (α) y una vez que el p-valor haya sido determinado, sabemos que se rechaza la H_0 cuando $\alpha > p$ -valor; por el contrario, la H_0 no se rechaza cuando $\alpha < p$ -valor.

4) Análisis de residuos

Escobar (2015) señala que los residuos, son en realidad las estimaciones de los valores de las perturbaciones aleatorias en cada observación. Mackay (1984) afirma que los primeros fundamentos sobre el método de los mínimos cuadrados están en la distribución de los residuos y en las propiedades elementales de la probabilidad compuesta, obteniendo de esta manera los mejores ajustes cuando el tipo de curva o función se ha elegido con acierto.

Ruiz (2007) expresa también, que para decidir si ponderar o no las ecuaciones se debe hacer un análisis gráfico de residuos. Esto consiste en graficar los residuos de los volúmenes calculados con las ecuaciones obtenidas versus volúmenes estimados.

Montgomery (2006) menciona que los residuales deben ser graficado en función de los volúmenes estimados y no de los volúmenes reales, porque los residuos y los volúmenes estimados no están correlacionados, mientras que los residuos y los volúmenes reales si suelen estar correlacionados.

Da Cunha, et al. (2009) mencionan que la gráfica de residuos es el elemento más importante para visualizar el desempeño de la ecuación de regresión, a partir de la cual es posible observar tendencias en las estimaciones propiciadas por las mismas.

Cailliez (1980) manifiesta que el análisis de residuos es un instrumento que debe emplearse con el siguiente propósito: determinar cuándo los residuales de la regresión confirman los supuestos del modelo, es decir no están correlacionados, están normalmente distribuidos y tienen varianza uniforme; evaluar la “falta de ajuste” en el modelo por una tendencia sistemática de los residuales y examinar visualmente la forma de las relaciones entre los residuales y posibles variables independientes todavía no introducidas en el modelo de regresión.

2.6. ANÁLISIS DE REGRESIÓN PONDERADA

Cunia (1964) afirma que en la estimación de volúmenes de árboles la homogeneidad de varianzas es la hipótesis más importante, pero como ya se ha mencionado, no se cumple. Para lograr la homogeneidad de varianzas es necesario transformar logarítmicamente las variables o ponderarlas, aplicando la regresión ponderada basada en los mínimos cuadrados ponderados.

Bouchon, citado por Barrena (1988), manifiesta que al transformar logarítmicamente las variables, los valores estimados por la regresión siempre serán sesgados, pues no pasan por el promedio de los datos observados. Cailliez (1980) añade que si la transformación es logarítmica, la estimación siempre subestimaré el volumen.

Ruiz (2007) expresa que la regresión debe ser ajustada con ponderaciones cuando la varianza del volumen depende de las variables explicativas. Barrena (1988) menciona que utilizar la regresión ponderada basada en los mínimos cuadrados ponderados, es la mejor alternativa en la elaboración de ecuaciones de volumen, puesto que permite resolver las violaciones a las hipótesis de los mínimos cuadrados que presentan las poblaciones forestales. Además, Cunia (1964) y Furnival (1961) agregan que los mínimos cuadrados ponderados mejoran la estimación del volumen.

Barrena (1988) también recomienda este método cuando se requiere elaborar ecuaciones de volumen obteniendo, además de un buen ajuste, las inferencias estadísticas de la ecuación. De la misma manera, Pecé et al. (1997), señalan que cuando se posee un amplio rango de diámetros, el empleo de mínimos cuadrados no es el adecuado, por lo que se debe recurrir a transformaciones logarítmicas o de ponderación, donde se ha comprobado que este último método produce un mayor acercamiento de la curva a los puntos de los árboles pequeños y medianos.

Montgomery et al. (2006) afirman que en el método de los mínimos cuadrados ponderados, se multiplica la diferencia entre los valores observados y esperados de la variable dependiente, por un peso o factor de ponderación. El factor de ponderación a usarse con este método debe ser inversamente proporcional a las varianzas de los valores por predecir. Por lo tanto, el factor de ponderación en la estimación de volúmenes de árboles debe ser proporcional a la inversa del dap al cuadrado por la altura (Barrena, 1988; Cunia, 1964, Cailliez, 1980; Ruiz, 2007).

2.7. ÍNDICE DE FURNIVAL

El Índice de Furnival permite comparar las ecuaciones de volumen teniendo la ventaja de reflejar la dimensión de los residuales y, además, las infracciones contra las condiciones de los mínimos cuadrados: linealidad, normalidad y homocedasticidad (Furnival, 1961).

Gayoso et al., citado por Escobar (2015), afirma que el Índice de Furnival es esencialmente una transformación aproximada de la función de verosimilitud y se debe tener presente entonces, que mide tanto la plausibilidad de la función de regresión como de la distribución de los desvíos implícita en ella.

La fórmula general del Índice de Furnival es la siguiente (Furnival, 1961):

$$IF = [f'(v)]^{-1} \sqrt{S}$$

Dónde:

IF = Índice de Furnival $f'(v)$ = Derivada de la variable

$[f'(v)]$ = Media geométrica de esta derivada S = Cuadrado Medio del Error

Furnival (1961) menciona que según esta expresión, cuando no se han transformado las variables ni se ha ponderado la ecuación de regresión, entonces el IF será igual a la raíz cuadrada del Cuadrado Medio del Error (S):

$$IF = \sqrt{S}$$

Pero si la ecuación es ponderada, entonces este índice será igual a:

$$IF = \sqrt{S} * \text{antilog}\left(\frac{1}{n} * \Sigma \text{Log} p\right)$$

Donde “p” es la inversa del factor de ponderación y “n” la cantidad de árboles evaluados (Furnival, 1961).

Entonces, mediante este índice se compara ecuaciones de volumen con diferente variable dependiente, en consecuencia, la ecuación que presente menor valor del Índice de Furnival será la mejor para estimar el volumen (Barrena, 1988).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO

La zona de estudio es el departamento de Ucayali, que se encuentra ubicada en la parte central oriental del territorio peruano, entre 07° 20' 23" y 11° 27' 35" de latitud sur; y a 70° 29' 46" y 75° 58' 08" de longitud oeste. Limita por el Norte con el departamento de Loreto; por el Sur con Junín, Cusco y Madre de Dios; por el Oeste con Huánuco y Pasco; y hacia el Este con el Estado de Acre (Brasil). Tiene una superficie de 102 410.55 km², equivalente al 7,9% del territorio nacional y al 19,6 % del territorio amazónico, siendo la segunda región amazónica más extensa del Perú, después de Loreto (IIAP, 2006).

El BCRP (2016) expresa que Ucayali se encuentra dividida políticamente en cuatro provincias: Coronel Portillo (154 msnm), Padre Abad (287 msnm), Purús (350 msnm) y Atalaya (450 msnm), y estas provincias se subdividen en 15 distritos, que son los siguientes:

- Coronel Portillo (7 distritos): Callería, Campoverde, Iparia, Masisea, Nueva Requena, Yarinacocha y Manantay.
- Padre Abad (3 distritos): Curimana, Irazola y Padre Abad.
- Purús (1 distrito): Purús.
- Atalaya (4 distritos): Raymondi, Sepahua, Tahuania y Yurúa.

Vásquez (2011) menciona que el clima predominante en Ucayali es el de un bosque húmedo tropical, con muy poca variación de temperatura y humedad entre el día y la noche. El IIAP (2006) expresa que la temperatura máxima se presenta entre agosto y octubre, y la mínima en junio, descendiendo de 31,9 a 20,5 °C en promedio respectivamente. El BCBR (2016) menciona que Ucayali presenta una precipitación pluvial que alcanza una media anual de 2 000 mm, la cual varía durante todo el año; mientras que el IIAP (2006) señala que la precipitación promedio anual es de 2344 mm. Además, BIODAMAZ (2005) menciona que la distribución mensual de la precipitación se puede agrupar de la siguiente manera: ciclo lluvioso (febrero – mayo), ciclo seco (junio – agosto), ciclo semi seco (septiembre –

noviembre) y ciclo semi lluvioso (diciembre – enero). La humedad relativa es en promedio 82% de febrero a octubre, y 74% entre junio a agosto; y la velocidad promedio de los vientos es de 1,4 m/s con dirección predominante de Norte a Sur.

La fisiografía de Ucayali se caracteriza por presentar formas de tierra variada, así se puede encontrar desde las formas con relieve accidentado o abrupto, representados por áreas restantes de las cordilleras del Divisor (cabeceras de los ríos Callería, Utuquinia, Abujao y Tamaya), Cordillera Azul y la cordillera de El Sira; hasta tipos de unidades fisiográficas con relieves que van desde la fisiografía plana, generalmente adyacente a los principales ríos, terrazas, colinas y zonas montañosas (MINAM, 2013). BIODAMAZ (2005) concuerda en que Ucayali presenta un relieve variado y además menciona se puede distinguir tres tipos de paisajes diferentes:

- **Ceja de Selva:** cuenta con una superficie de 1,028 km² (1%) que se extiende sobre los 800 a 1,000 msnm. en las nacientes de los ríos Sepa, Unine y Castingari en Atalaya. El paisaje se caracteriza por ser montañosa, con estrechos y profundos valles de pendientes pronunciadas. Teniendo un clima templado con alta nubosidad y lluvias intensas, le confiere un carácter de extrema fragilidad frente a los procesos erosivos.
- **Selva Alta:** ocupa un área de 12,948 km² (13%), ubicado entre los 400 y 800 msnm. Se caracteriza por valles de gran longitud, con terrazas escalonadas hasta en tres niveles, siendo las terrazas bajas las que ofrecen mejores condiciones para la actividad agropecuaria. Presenta un paisaje colinoso.
- **Selva Baja:** se extiende por debajo de los 400 msnm., con una superficie de 88,434 km² (86%). El relieve predominantemente es plano, aunque se aprecia paisajes de colinas y terrenos disectados principalmente en la zona de transición hacia la selva alta (nacientes de los ríos Tabacoas, Iparia, Sipiria, Sempaya y Neshuya).

En Ucayali la red hidrográfica está conformada por 502 ríos principales y afluentes, clasificados del primer al quinto orden. Se estima, que el volumen de agua escurrida a nivel de la región es alrededor de 43 millones de metros cúbicos, que conforman cinco cuencas importantes en toda su extensión, la del río Ucayali, río Aguaytia, río Yurúa, río Urubamba y río Purús (BIODAMAZ, 2005; IIAP, 2006).

La cuenca de mayor importancia es la del río Ucayali, que tiene una extensión total de 1,771 km (734 Km. dentro de la región), por constituir la vía principal de comunicación dentro de la región. El Ucayali es un río caudaloso y sinuoso, con 200 a 400 m de ancho, navegable durante todo el año por embarcaciones de hasta 5 pies de calado en época de vaciante (abril – septiembre); nace de la confluencia entre los ríos Tambo y Urubamba, y no cuenta con articulación con las cuencas de los ríos Alto Purús y alto Yurúa, también de importancia, los cuales tienen mayor facilidad de navegación hacia el Brasil. El Ucayali en su camino da formación al río Amazonas en la región de Loreto (BIODAMAZ, 2005).

MINAM (2013) señala que en Ucayali los suelos predominantes según el sistema de clasificación de suelos de la FAO para la selva baja son: los acrisols (suelos ácidos), cambisols (más fértiles y permiten el cambio de uso a agroforestería), y gleysols (suelos amarillos que presentan mal drenaje). En la selva alta y ceja de selva, se presentan los fluvisols (suelos fértiles, muy jóvenes) que se encuentran a lo largo de los ríos, en terrazas bajas e intermedias, son fértiles, muy jóvenes y resisten bien el cambio de uso de forestal a pecuario y agrícola.

BIODAMAZ (2005) menciona que la clasificación de las tierras por su capacidad de uso mayor es como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2: Clasificación de Uso Mayor de tierras en Ucayali

<i>Uso</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Cultivos en limpio (A)</i>	441 084	4,3
<i>Cultivos permanentes (C)</i>	404 313	3,9
<i>Pastos (P)</i>	693 524	6,8
<i>Forestal (F)</i>	7 434 735	72,6
<i>Protección (X)</i>	1 267 399	12,4
<i>TOTAL</i>	10 241 055	100

FUENTE: BIODAMAZ (2005).

Según el INRENA, citado por UNALM-ITTO (2009), el área de estudio presenta seis zonas de vida y cuatro transiciones, correspondientes a tres provincias de humedad (zonas de vida húmedas a pluviales), distribuidas en tres pisos altitudinales. Las zonas de vida y las transiciones son las siguientes:

- bosque húmedo - Tropical (bh-T)
- bosque húmedo - Tropical transicional a bosque húmedo - Premontano Tropical (bh-T / bh-PT)
- bosque húmedo - Premontano Tropical (bh-PT)
- Bosque húmedo - Premontano Tropical transicional a bosque húmedo – Tropical (bh-PT/ bh-T)
- bosque muy húmedo - Tropical (bmh-T)
- bosque muy húmedo – Premontano Tropical transicional a bosque húmedo Tropical (bmh- PT/ bh-T)
- bosque muy húmedo - Premontano Tropical (bmh-PT)
- bosque muy húmedo - Premontano Tropical, a bosque pluvial Premontano Tropical (bmh-PT/bp-PT)
- bosque pluvial – Premontano Tropical (bmh PT), y bosque pluvial – Montano Bajo Tropical (bp – MBT).

Los bosques de Ucayali presentan una extensión de 8,7 millones de hectáreas, representando el 85% de la región, constituyendo el recurso renovable con mayor potencial. De esa superficie, 8 millones de hectáreas fueron declarados productivos de los cuales el 47% corresponden a bosques de producción permanente, y 53% pertenece a las comunidades nativas, áreas reservadas y parceleros particulares. El aprovechamiento es a través de concesiones forestales. Los bosques de protección representan el 10% aproximadamente y corresponde a los bosques de montaña y las zonas aluviales de protección, principalmente zonas ribereñas (IIAP, 2006).

Los tipos de bosque, uso de la tierra y cobertura vegetal que se presentan en Ucayali se muestran en la Tabla 3, donde se observa que el tipo de bosque de mayor superficie es Bosque Húmedo Tropical de Colina baja, donde existe presencia de árboles de caoba.

Tabla 3: Tipos de bosque, usos de la tierra y cobertura vegetal

<i>Tipo de Bosque</i>	<i>Área (ha)</i>
<i>Actividad Agropecuaria / Bosque secundaria*</i>	956 262,34
<i>Bosque Húmedo de Montaña</i>	625 106,72
<i>Bosque Húmedo Tropical con Bambú de Colina alta*</i>	151 760,58
<i>Bosque Húmedo Tropical con Bambú de Colina baja*</i>	3 167 757,39
<i>Bosque Húmedo Tropical con Bambú de Terraza alta</i>	14 895,14
<i>Bosque Húmedo Tropical con Bambú de Terraza baja</i>	24 323,03
<i>Bosque Húmedo Tropical de Colina alta*</i>	467 297,43
<i>Bosque Húmedo Tropical de Colina baja*</i>	2 572 891,84
<i>Bosque Húmedo Tropical de Lomada*</i>	114 164,55
<i>Bosque Húmedo Tropical de Terraza alta*</i>	610 992,34
<i>Bosque Húmedo Tropical de Terraza baja*</i>	731 916,25
<i>Bosque Húmedo Tropical de Terraza baja inundable</i>	515 309,94
<i>Bosque Húmedo Tropical de Terraza media*</i>	227 141,82
<i>Bosque Húmedo Tropical Hidromórfico</i>	47 168,91

* Tipos de bosque con presencia de *Swietenia macrophylla* King

FUENTE: UNALM-ITTO (2009)

2. EQUIPOS Y MATERIALES

2.1. EQUIPOS

- Computadora Toshiba Satellite C55-B5218BK
- Impresora HP Laser Jet P2035n

2.2. SOFTWARE

- Microsoft Office 2010

2.3. MATERIALES

- Útiles de escritorio

2.4. DATOS

El presente estudio se realizó con información obtenida por el proyecto UNALM-ITTO PD 251/03 Rev. 3(F) “Evaluación de las existencias comerciales y estrategia para el manejo sostenible de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el Perú”.

En el año 2006 se evaluaron 103 árboles (a partir de 30 cm de dap) ubicados en diferentes parcelas de corta anual (PCA) en cuatro sectores en la región de Ucayali denominados sector “CLA”, “EDOR”, “RCP” y “SCL”: En los sectores “CLA” y “EDOR” ubicados en el distrito de Yurúa, provincia de Atalaya, se evaluaron 59 árboles; y en los sectores “RCP” y “SCL” ubicados en el distrito de Purús, provincia de Purús, se evaluaron 44 árboles. El mapa de ubicación se puede observar en la Figura 4. Los datos brindados por cada árbol se observan en el Anexo 1.

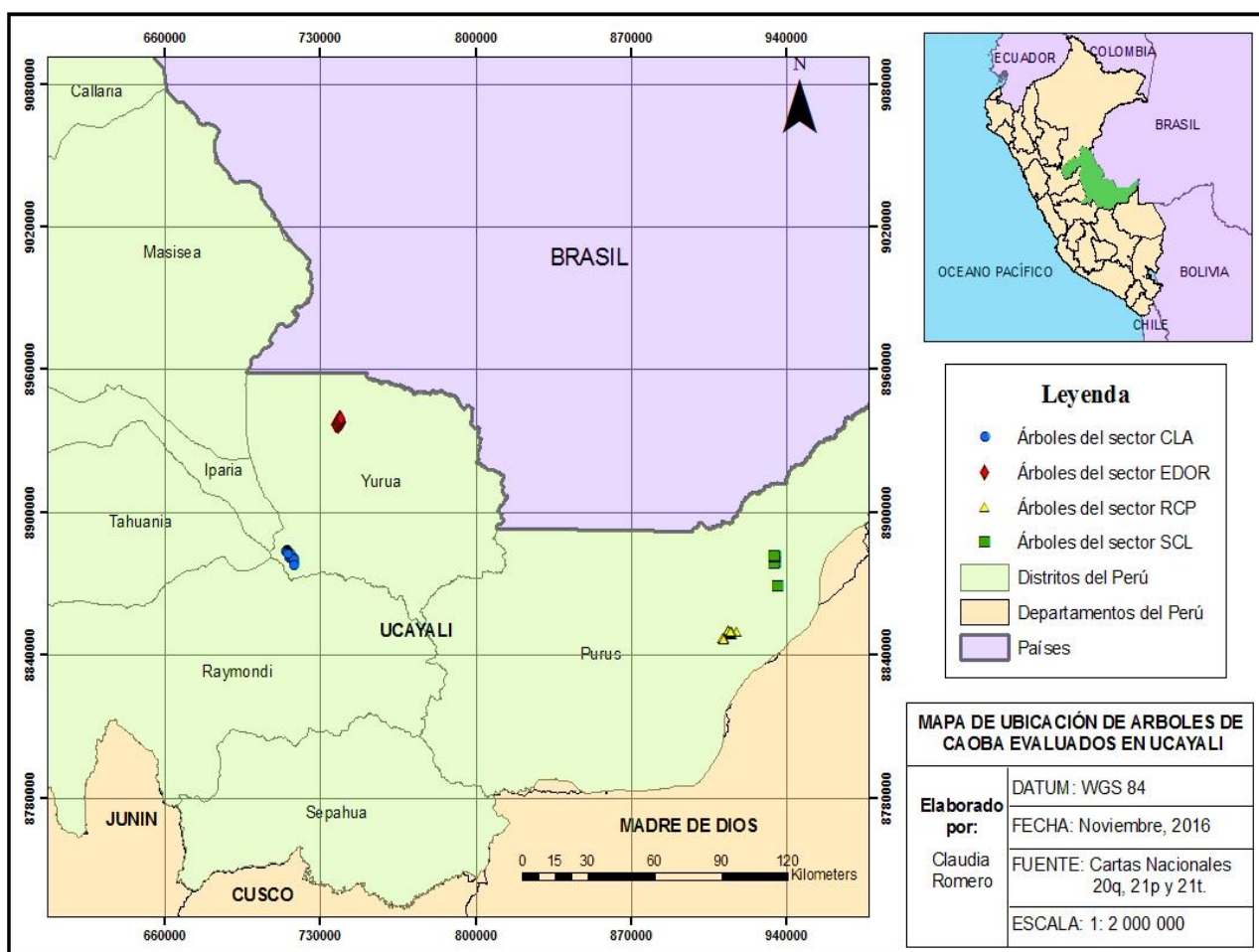


Figura 4: Mapa de ubicación de árboles de caoba evaluados en Ucayali.

FUENTE: Elaboración propia

Las mediciones de los diámetros a diferentes alturas se hicieron con el relascopio de Bitterlich siguiendo la metodología desarrollada por Barrena et al. (2008):

- a) Se midió el dap, así como la altura al punto de copa o altura comercial.
- b) Se realizaron 2 mediciones de los diámetros a diferentes alturas siendo estas la del diámetro mayor y el diámetro menor de los árboles seleccionados (Figura 5).

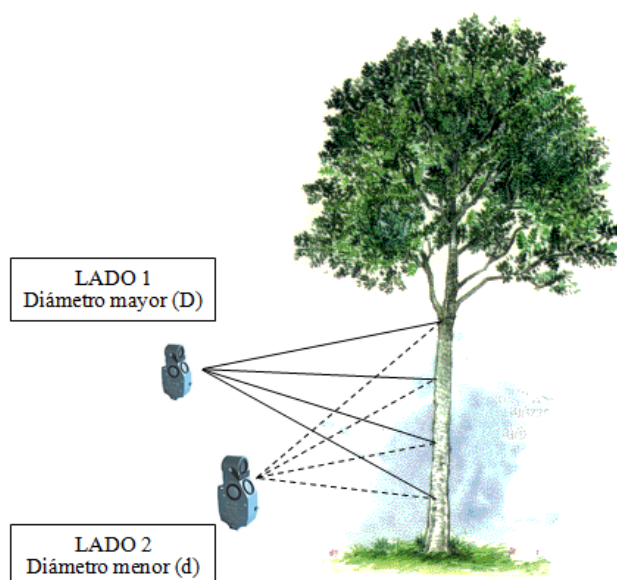


Figura 5: Mediciones de diámetro a diferentes alturas

FUENTE: Barrena, et al., 2008

- c) Si la altura comercial era mayor o igual a los 12 m, el diámetro se midió cada 2 m (trozas de 2 m en 2 m).
- d) Si la altura comercial era menor o igual a los 12 m, el diámetro se midió cada 1 m (trozas de 1 m en 1 m).
- e) En ambos caso, se indicó la longitud de la última troza, pudiendo ser diferente de 1 o 2 m.

3. METODOLOGÍA

La secuencia metodológica para se puede observar en la Figura 6.

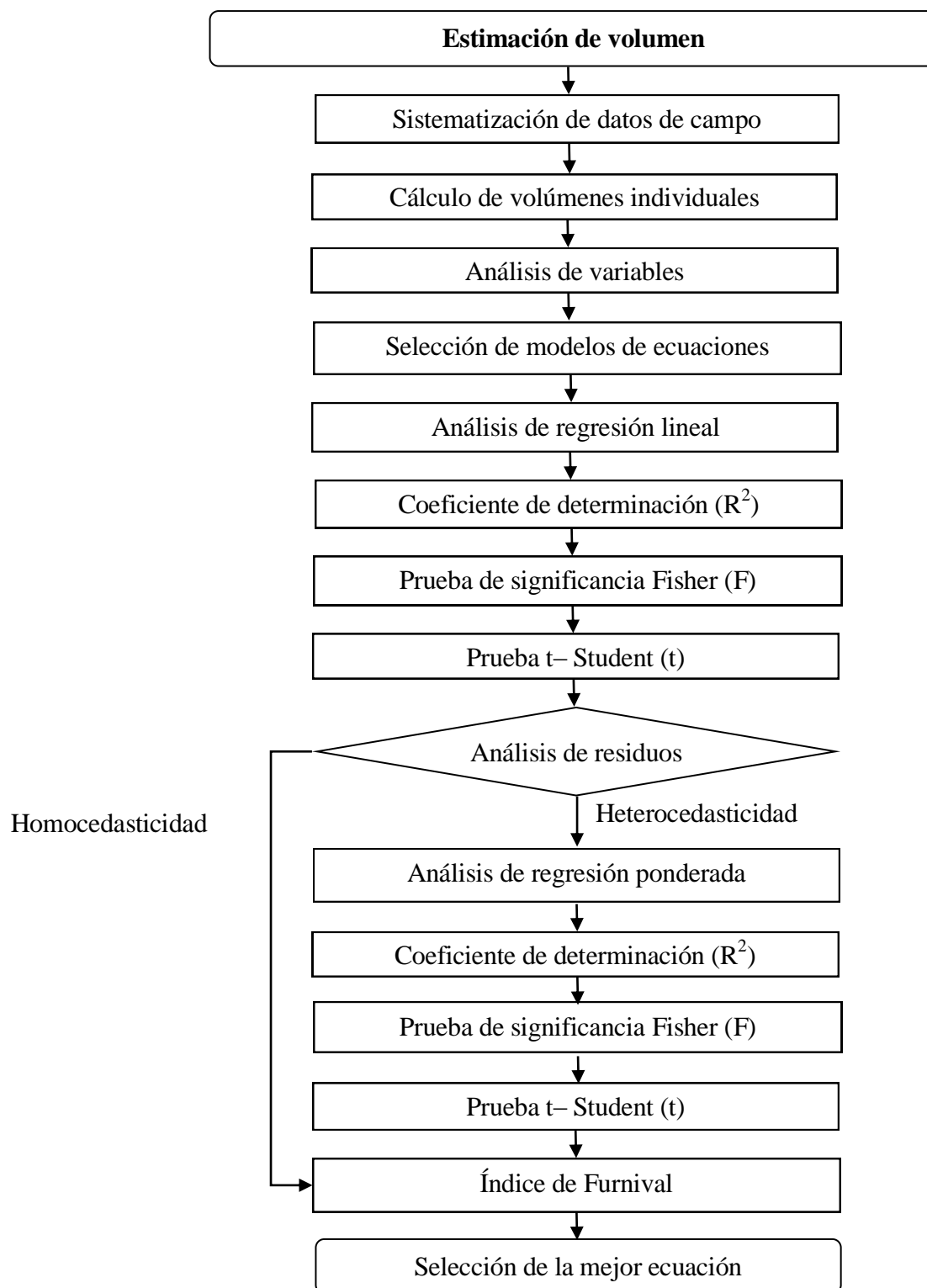


Figura 6: Secuencia metodológica para la estimación del volumen.

FUENTE: *Elaboración propia*

3.1. DATOS DE CAMPO

3.1.1. SISTEMATIZACIÓN DE LOS DATOS DE CAMPO

Siguiendo la metodología propuesta por Guillén (2014) todos los valores de diámetros a diferentes alturas de los árboles muestreados fueron ordenados con el propósito de tener pares de datos (di, hi), es decir un diámetro (di) y la altura (hi) donde éste diámetro fue medido. Posteriormente, se realizó un histograma de frecuencias para el análisis de la distribución de individuos por clase diamétrica.

3.1.2. CÁLCULO DE VOLÚMENES INDIVIDUALES

Según las mediciones obtenidas, cada fuste fue dividido en una cantidad determinada de secciones, dependiendo de su altura comercial. Para calcular el volumen de cada sección, se utilizó la fórmula de Smalian (Cailliez, 1980; Prodan, et al., 1997; Cancino, 2006):

$$V = \frac{\pi (D + d)^2}{4 \cdot 2} * L$$

Dónde:

V= Volumen (m³)

D= Diámetro mayor de la sección (m)

L= Longitud de la sección (m)

d= Diámetro menor de la sección (m)

Los volúmenes de cada sección fueron sumados para hallar el volumen total de cada individuo.

3.1.3. ANÁLISIS DE VARIABLES

Se realizaron graficas de dispersión, donde en el eje de las ordenadas (y) se colocó el volumen real de los 103 árboles medidos, mientras que en el eje de las abscisas (x) se colocaron las variables independientes: dap, h, dap², dap²h.

Siguiendo a Chatterjee y Price (1977) y Guillén (2014), se realizó un análisis visual de la distribución obtenida para detectar valores atípicos (conocido como “*outliers*”), con la finalidad de eliminarlos y homogenizar la distribución de datos.

3.2. ECUACIONES

3.2.1. SELECCIÓN DE MODELOS DE ECUACIONES

Se siguió el procedimiento propuesto por Barrena, et al. (1986). Se consultó bibliografía referente a ecuaciones de volumen, y se seleccionó un determinado grupo de modelos de ecuaciones que fueron aquellos que se emplearon con mayor frecuencia en estudios similares.

3.2.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Las ecuaciones elegidas se sometieron a un procedimiento de regresión lineal basado en el método de los mínimos cuadrados a través de la herramienta “Análisis de datos” del *software* Microsoft Excel. Se analizaron los resultados y el criterio para la selección de ecuaciones fue el propuesto por Barrena et al. (1986), da Cunha, et al., (2009) y Escobar (2015):

- a) **Coefficiente de determinación (R^2):** El primer criterio de selección fue analizando los resultados del R^2 de todas las ecuaciones seleccionadas, donde se eliminaron aquellas ecuaciones que presentaron un R^2 inferior a 0,75 (Alvarado y Obagui, 2008).
- b) **Prueba estadística Fisher (F):** El segundo criterio fue mediante el análisis de las pruebas estadística F, para determinar la significancia estadística de las variables de la ecuación. Para ello, se siguió la metodología propuesta por Mendiburu (s.f.) donde se evaluaron las siguientes hipótesis:

$H_0: \beta_1 = 0$. No existe una regresión lineal entre X e Y.

$H_1: \beta_1 \neq 0$. Existe regresión lineal de Y en función de X.

El criterio de decisión de rechazar la hipótesis nula (H_0) y corroborar estadísticamente que sí existe relación entre las variables, fue determinado por el “p-valor” del estadístico F y siguiendo lo propuesto por Rojo (2012) se evaluó a un nivel de confianza de 95% ($\alpha = 0,05$) donde se eliminaron aquellas ecuaciones que presentaron un p-valor superior al α (p-valor $> 0,05$).

- c) **Prueba estadística t- Student (t):** Para determinar si los coeficientes estimados en la ecuaciones propuestas son estadísticamente diferentes de cero, se plantearon las siguientes hipótesis:

$H_0: \beta_1 = 0$. El coeficiente es estadísticamente igual a cero

$H_1: \beta_1 \neq 0$. El coeficiente es estadísticamente diferente a cero.

La decisión de eliminar ecuaciones en esta etapa fue igual a la que se realizó para la prueba F. Entonces, se eliminaron aquellas ecuaciones que no presentaron significancia estadística a un 95%, es decir, presentaron un p-valor superior a 0,05 por lo menos en alguno de sus coeficientes estimados.

- d) **Análisis de los residuos:** Para juzgar la calidad de los análisis de regresión basados en el método de los mínimos cuadrados, se procedió a analizar los residuos siguiendo la recomendación de la FAO (1981). El análisis de residuos consistió en calcular y graficar los residuales (eje y) versus el volumen estimado (eje x) por cada ecuación, con la finalidad de ver la distribución de los mismos y determinar si se cumple con el supuesto de homocedasticidad. Si los residuos se presentaron de manera homogénea, se determinó el Índice de Furnival para ecuaciones que no han sido transformadas ni ponderadas (Furnival, 1961). Sin embargo, si los residuos fueron heterogéneos, el siguiente paso fue ponderar las ecuaciones.

3.2.3. ANÁLISIS DE REGRESIÓN PONDERADA

Para resolver problemas de heterocedasticidad, se crearon nuevos modelos de ecuaciones. La construcción de los nuevos modelos, consistió en agregarle pesos o factores de ponderación ($\frac{1}{K}$) a cada una de las ecuaciones que fueron seleccionadas anteriormente (Ruiz, 2007; Escobar, 2015).

El criterio para la determinación de los factores de ponderación ($\frac{1}{K}$) fue utilizar las variables independientes presentes en cada ecuación en particular como pesos de la misma. Es decir, si la ecuación presentaba dos variables independientes, estas dos variables se tomaron como pesos, así como las mismas variables elevadas a diferentes exponentes (Escobar, 2015).

Cabe mencionar que a diferencia de lo propuesto por Barrena (1988), Flores (1995), Bautista (2000) y Ruiz (2007), que solo utilizan cuatro factores de ponderación para todos sus modelos de ecuaciones ($1/dap^2$; $1/dap^4$; $1/dap^2h$ y $1/dap^4h^2$), en la presente investigación se utilizaron tantos factores de ponderación como fuera necesario, es decir, se fue probando pesos que contenían las variables independientes elevadas a diferentes exponentes, hasta encontrar aquel valor que logró homogenizar las varianzas de los residuos. Esta decisión se tomó bajo lo propuesto por Barrena (1988) que menciona que el factor de ponderación puede cambiar de acuerdo a cómo el volumen se relaciona con las variables independientes.

A manera de ejemplo, se realiza los pasos de ponderación para el siguiente modelo:

$$V = b_0 + b_1dap^2$$

Para este modelo, se pueden dar dos casos: cuando el peso es igual a la variable independiente o cuando el peso es diferente a la variable independiente. Para el primer caso tenemos: $\frac{1}{K} = \frac{1}{dap^2}$ entonces este valor multiplica a todas las variables de la ecuación, por lo que se tiene:

$$V \left(\frac{1}{dap^2} \right) = b_0 \left(\frac{1}{dap^2} \right) + b_1dap^2 \left(\frac{1}{dap^2} \right)$$

Así el modelo toma la siguiente forma: $\frac{V}{dap^2} = \frac{b_0}{dap^2} + b_1$, donde el intercepto (b_0) toma el valor del b_1 y el coeficiente de la variable dependiente (b_1) toma el valor del b_0 .

Para el segundo caso, cuando el peso es diferente: $\frac{1}{K} = \frac{1}{dap^3}$ el modelo ponderado es el siguiente:

$$V \left(\frac{1}{dap^3} \right) = b_0 \left(\frac{1}{dap^3} \right) + b_1dap^2 \left(\frac{1}{dap^3} \right)$$

El modelo toma la siguiente forma: $\frac{V}{dap^3} = 0 + \frac{b_0}{dap^3} + \frac{b_1}{dap}$. En este caso el intercepto se hace cero para la regresión (Chatterjee y Price, 1977).

Según lo propuesto por Barrena (1988), los nuevos modelos de ecuaciones fueron sometidos a un procedimiento de regresión ponderada, y el método para la elección de la mejor ecuación ponderada fue la misma que se aplicó para la regresión sin ponderar, es decir, se analizó el Coeficiente de Determinación (R^2), pruebas estadísticas Fisher (F) y t- Student (t) y el análisis gráfico de residuos; donde se rechazaron aquellas ecuaciones que no cumplían con los criterios mencionados anteriormente. Así mismo, de tener más de una ecuación por modelo que cumpla con lo establecido, se seleccionó aquella ecuación que presentó la mejor distribución de los residuos dentro de cada modelo.

3.3. ELECCIÓN DE LA MEJOR ECUACIÓN

Una vez seleccionadas las ecuaciones ponderadas, se determinó el Índice de Furnival (IF) para cada una de ellas, ya que este permite la comparación de las ecuaciones con distintas variables dependientes. La ecuación con menor IF fue elegida como la ecuación que mejor estima el volumen de los árboles en pie de la caoba en Ucayali. Para hallar el IF se empleó la siguiente fórmula (Furnival, 1961):

$$IF = \sqrt{S} * \text{antilog}\left(\frac{1}{n} * \sum \text{Log}p\right)$$

Donde S es la raíz cuadrada del CME, “p” es la inversa del factor de ponderación y “n” la cantidad de árboles evaluados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. DATOS DE CAMPO

1.1. ORDENAMIENTO DE LOS DATOS DE CAMPO

El primer paso fue corroborar la información de la base de datos digital (hojas de cálculo de Excel) con la información contenida en las fichas de campo entregada por el proyecto UNALM-ITTO PD 251/03 Rev. 3(F) “Evaluación de las existencias comerciales y estrategia para el manejo sostenible de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el Perú”. Se determinó que los datos de la base digital y los de las fichas de campo correspondiente a los 103 árboles evaluados eran iguales; luego se siguió la metodología propuesta por Guillén (2014) y se ordenaron los datos que correspondían a los diámetros (cm) a diferentes alturas y sus respectivas alturas (m). En la Tabla 4, se presenta los datos ordenados de solamente dos árboles a manera de ejemplo:

Tabla 4: Datos de diámetros y alturas ordenados.

N°	Sector	Código del árbol	D1 (cm)	D2 (cm)	D prom (cm)	Altura (m)
1	RCP	RCP-001	88,00	90,00	89,00	1,30
			82,50	87,50	85,00	2,00
			81,25	85,00	83,13	4,00
			76,25	78,75	77,50	6,00
			71,25	77,50	74,38	8,00
			67,50	73,75	70,63	10,00
			65,00	71,25	68,13	12,00
			55,00	62,50	58,75	14,00
			52,50	60,00	56,25	16,00
2	RCP	RCP-002	77,50	80,00	78,75	1,30
			77,50	80,00	78,75	2,00
			72,50	71,25	71,88	4,00
			67,50	67,50	67,50	6,00
			65,00	62,50	63,75	8,00
			58,75	60,00	59,38	10,00
			56,25	52,50	54,38	12,00
			55,00	47,50	51,25	14,00
			50,00	47,50	48,75	14,25

Los códigos de cada árbol son correlativos y muestra la información del sector donde se encuentra ubicado. Por ejemplo, el código RCP-001 señala que el árbol N° 1 se encuentra en el sector RCP.

En la Figura 7 se muestra un histograma con los resultados de la distribución de árboles por clase diamétrica y su frecuencia. Aquí se observa que el rango de dap de los individuos evaluados va desde 0,3 m a 2,5 m. El menor y mayor dap de los individuos evaluados es 38 cm y 245 cm respectivamente. Además, el histograma de frecuencias, muestra que la mayor cantidad de individuos poseen diámetros entre 0,90 - 1,00 m y 1,30 - 1,40 m (12 individuos en cada clase). Asimismo, se observa que la estructura de la distribución concuerda con los resultados obtenidos por Ríos et al., (2002) y Lombardi y Vargas (2006) sobre la aproximación de la estructura diamétrica de las poblaciones comerciales de caoba del país. Estos autores expresan que la estructura se asemeja a una “campana” muy plana, en un rango de 0,30 – 2,00 m de dap con una mayoría de individuos en los rangos de 0,90 - 1,00 m de dap.

Por otro lado, existe ausencia de individuos en las clases diamétricas superiores [2,20-2,40> lo que podría indicar el aprovechamiento de esta población, dejando individuos en clases diamétricas similares como árboles semilleros para asegurar la regeneración natural de la especie.

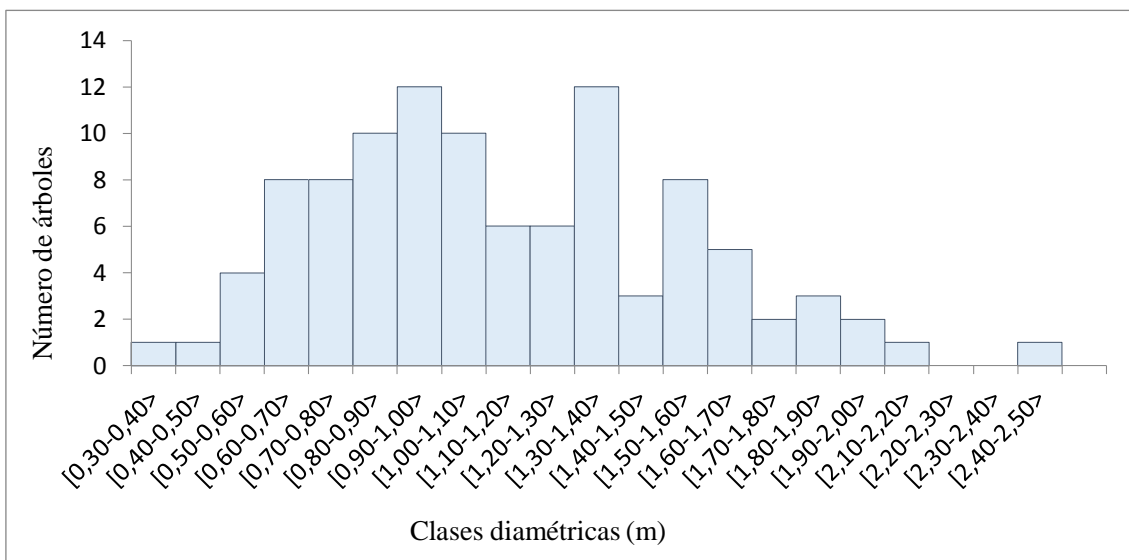


Figura 7: Distribución de árboles por clase diamétrica.

FUENTE: *Elaboración propia.*

1.2. CÁLCULO DE VOLÚMENES INDIVIDUALES.

Los volúmenes fueron calculados utilizando la fórmula de Smalian para todas las secciones del fuste de cada árbol evaluado. En promedio, cada árbol evaluado presentó 8 mediciones de diámetros a diferentes alturas.

La suma de las secciones por árbol dieron como resultado final el volumen total por cada individuo y estos se muestran en la Tabla 5. La principal observación es la gran diferencia entre los extremos de los volúmenes hallados, donde el individuo con menor volumen tiene $0,340 \text{ m}^3$ y el individuo con mayor volumen tiene $40,568 \text{ m}^3$. El volumen total de la muestra evaluada es de $978,5 \text{ m}^3$, el promedio por árbol es $9,5 \text{ m}^3$ y la desviación estándar es de $7,4 \text{ m}^3$. Los resultados completos se pueden ver en el Anexo 1.

Tabla 5: Volumen (m^3) de árboles individuales.

N°	Volumen	N°	Volumen	N°	Volumen	N°	Volumen
1	6,178	27	9,959	53	1,162	79	13,741
2	4,262	28	8,326	54	2,921	80	7,549
3	3,821	29	19,545	55	8,229	81	3,405
4	6,214	30	2,778	56	23,931	82	3,277
5	3,871	31	14,335	57	18,655	83	16,015
6	13,366	32	2,512	58	1,853	84	11,199
7	2,410	33	4,369	59	0,883	85	5,360
8	6,424	34	3,856	60	8,508	86	28,629
9	8,770	35	20,833	61	7,438	87	12,208
10	5,206	36	15,670	62	29,020	88	3,523
11	20,535	37	1,539	63	26,929	89	6,378
12	6,069	38	1,667	64	1,453	90	9,944
13	6,758	39	5,222	65	11,977	91	11,850
14	9,211	40	9,399	66	24,278	92	5,764
15	6,239	41	16,064	67	8,559	93	14,678
16	13,386	42	14,096	68	14,580	94	1,652
17	4,177	43	22,316	69	7,944	95	3,738
18	5,226	44	5,531	70	4,052	96	17,848
19	4,443	45	6,481	71	7,994	97	3,175
20	20,359	46	2,688	72	17,345	98	22,196
21	8,947	47	3,031	73	6,030	99	12,660
22	12,712	48	0,648	74	14,164	100	40,568
23	4,762	49	2,386	75	7,777	101	3,399
24	10,499	50	1,861	76	6,375	102	11,489
25	9,622	51	0,340	77	9,048	103	18,045
26	6,752	52	3,190	78	10,245		

1.3. ANÁLISIS DE VARIABLES

En las Figuras 8, 9, 10 y 11 se muestran gráficos de dispersión que señalan la relación entre la variable dependiente: volumen, y cuatro variables independientes: dap, h, dap^2 y dap^2h de los 103 árboles evaluados. Estos gráficos resultaron ser útiles para describir el comportamiento del conjunto de variables, porque representa los datos disponibles en una misma escala (Alea, et al., 2005).

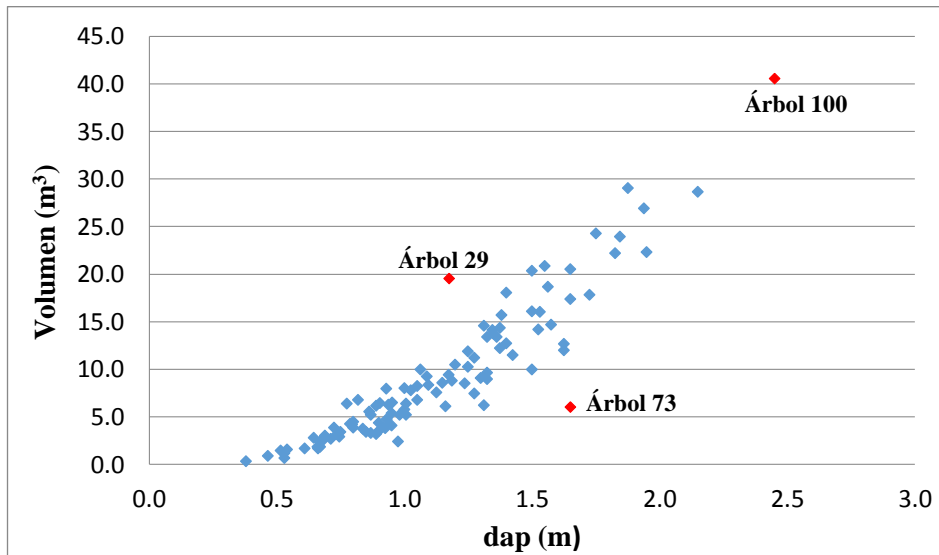


Figura 8: Relación del volumen y dap de 103 árboles de caoba.

FUENTE: Elaboración propia

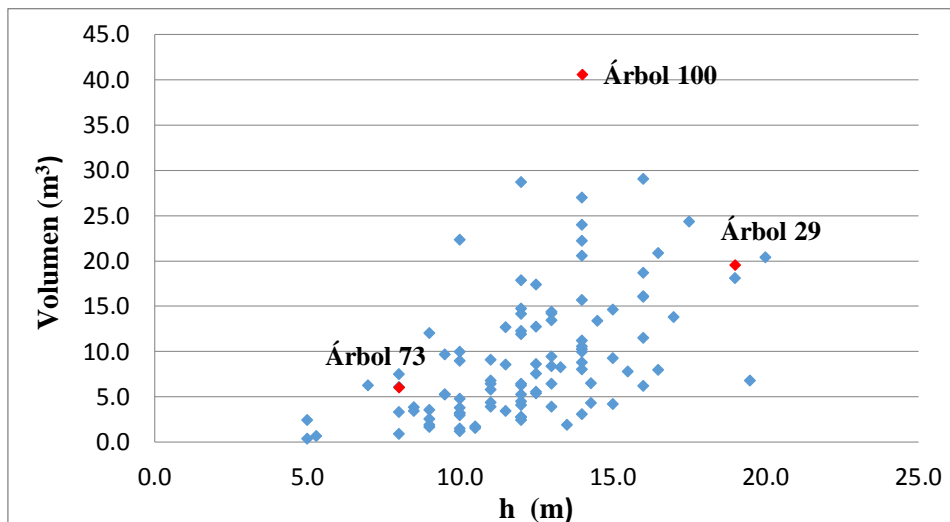


Figura 9: Relación del volumen y altura de fuste de 103 árboles de caoba.

FUENTE: Elaboración propia

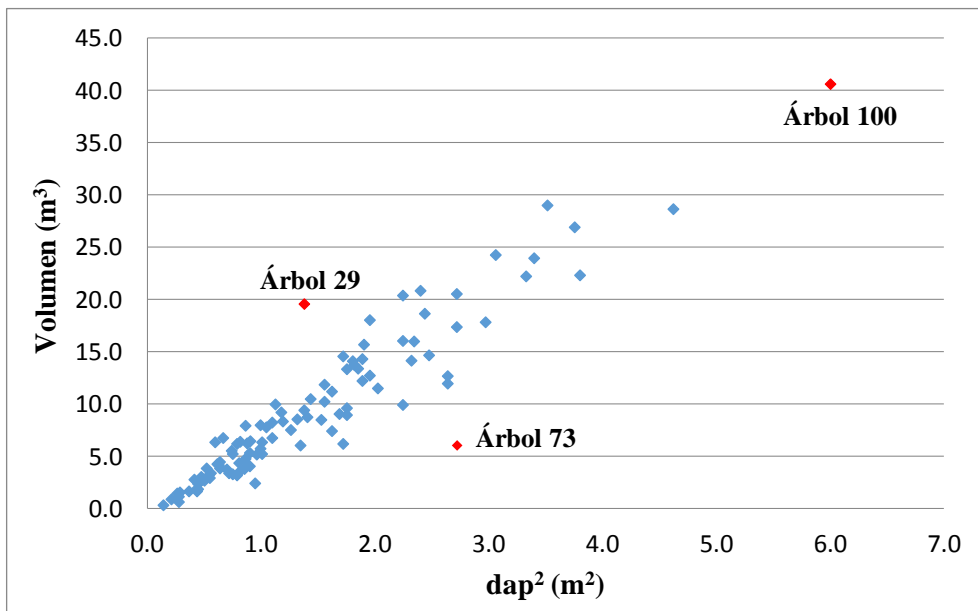


Figura 10: Relación del volumen y dap^2 de 103 árboles de caoba.

FUENTE: Elaboración propia

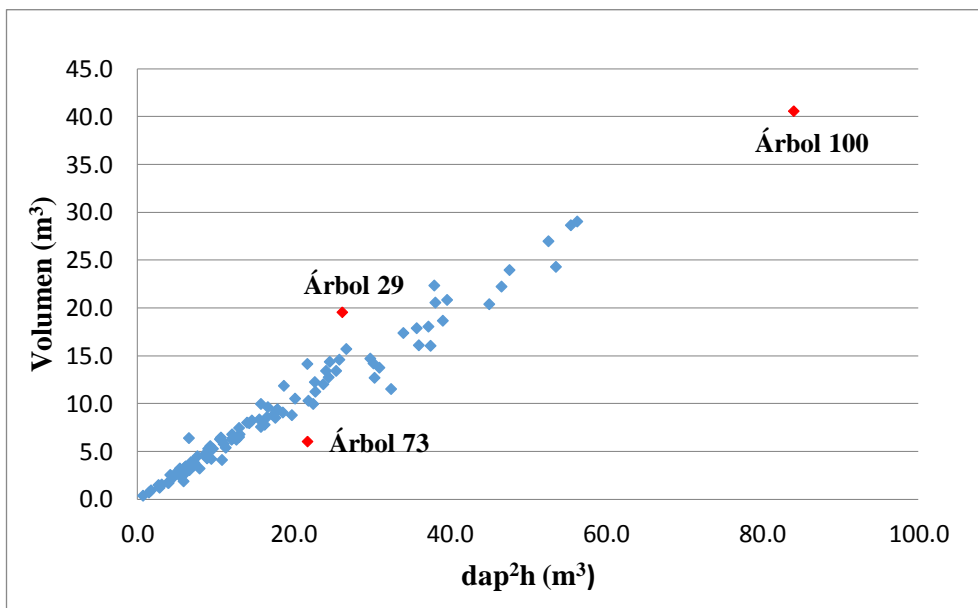


Figura 11: Relación del volumen y dap^2h^2 de 103 árboles de caoba.

FUENTE: Elaboración propia

La Figura 8 muestra los datos del dap y su relación con el volumen y se observa que a medida que aumenta el dap, el volumen incrementa de manera exponencial. Por otro lado, en la Figura 9, que relaciona la altura comercial y el volumen, se observa que los datos se

encuentran dispersos. Aguayo (2007) menciona que esto no significa que ambas variables no estén relacionadas sino que no están relacionadas “linealmente”. Bajo este supuesto, se podría indicar en primera instancia que la altura por sí sola no es una variable que represente un buen ajuste para estimar el volumen de árboles. Las Figuras 10 y 11 muestran una relación lineal positiva, es decir, a medida que aumenta la variable independiente, aumenta también la variable dependiente.

Es importante mencionar, que en las figuras mostradas con anterioridad se han resaltado con color rojo los valores denominados atípicos u “*outliers*”, pertenecientes a los árboles N° 29, 73 y 100. Se revisaron estos árboles a detalle y se obtuvo el siguiente resultado:

- El árbol 29 presenta un dap promedio de 1,17 m; una altura de 19,00 m y un volumen de 19,545 m³. Sin embargo, los cinco árboles que pertenecen a la misma clase diamétrica (1,1 m -1,2 m), tienen alturas y volúmenes promedio de 12,00 m y 8,069 m³ respectivamente. Ante ello, se infiere que debido al exceso de altura para esa clase diamétrica, se obtiene un volumen superior al promedio y por ello en los gráficos mostrados este valor se encuentra por encima de la tendencia.
- Caso contrario presenta el árbol 73, que posee un diámetro de 1,65 m; una altura de 8 m y un volumen de 6,030 m³, y los cuatro árboles de la misma clase diamétrica (1,6 m – 1,7 m) poseen alturas y volúmenes promedio de 11,750 m y 15,629 m³. Por lo tanto, se infiere que debido a su baja altura se obtiene un volumen inferior al promedio, y por ello en el gráfico se encuentra por debajo de la tendencia.
- Si bien el árbol 100 sigue la tendencia de las relaciones mostradas, este valor se encuentra muy alejado del valor promedio de los datos, por lo cual se le ha considerado también como un valor atípico, ya que podría afectar la variabilidad de los resultados de tenerlo en cuenta en los futuros análisis.

Ante éste análisis, se decidió eliminar estos tres datos con la finalidad de tener una muestra homogénea que represente el volumen promedio de la especie (Guillén, 2014). Así, la muestra con la que se trabajará en los análisis posteriores para la elección de la mejor ecuación queda reducida a 100 árboles, con un volumen total de 912,355 m³ y un volumen promedio por especie de 9,124 m³.

2. ECUACIONES

2.1. SELECCIÓN DE MODELOS DE ECUACIONES

Se revisó en la literatura y se seleccionó los modelos que son empleados con mayor frecuencia en estudios similares, escogiendo aquellos modelos que se repiten en dichas investigaciones. Así, en Tabla 6 se presentan los 24 modelos de ecuaciones seleccionados para el desarrollo de la presente investigación.

Tabla 6: Modelos de ecuación de volumen seleccionados.

Número	Modelo
1	$V=b_0 + b_1dap$
2	$V=b_0 + b_1daph$
3	$V=b_0 + b_1dap^2$
4	$V=b_0 + b_1dap^2h$
5	$V=b_0 + b_1h$
6	$V=b_0 + b_1dap + b_2dap^2$
7	$V=b_0 + b_1dap^2 + b_2h$
8	$V=b_0 + b_1dap + b_2h$
9	$V=b_0 + b_1daph + b_2h$
10	$V=b_0 + b_1h + b_2dap^2h$
11	$V=b_0 + b_1dap + b_2dap^2h$
12	$V=b_0 + b_1dap^2 + b_2dap^2h$
13	$V=b_0 + b_1daph + b_2dap^2h$
14	$V=b_0 + b_1dap^2 + b_2daph$
15	$V=b_0 + b_1dap^2 + b_2h + b_3dap^2h$
16	$V=b_0 + b_1dap + b_2dap^2 + b_3daph$
17	$V=b_0 + b_1dap + b_2dap^2 + b_3dap^2h$
18	$V=b_0 + b_1dap + b_2daph + b_3dap^2h$
19	$V=b_0 + b_1dap + b_2dap^2 + b_3h$
20	$V=b_0 + b_1daph + b_2dap^2 + b_3h$
21	$V=b_0 + b_1dap + b_2h + b_3dap^2h$
22	$V=b_0 + b_1dap + b_2daph + b_3dap^2 + b_4dap^2h$
23	$V=b_0 + b_1dap + b_2h + b_3dap^2 + b_4dap^2h$
24	$V=b_0 + b_1dap + b_2daph + b_3dap^2 + b_4h + b_5dap^2h$

FUENTE: Bautista (2000), Ruiz (2007) y Escobar (2015)

2.2. ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Los 24 modelos propuestos fueron sometidos al procedimiento de regresión lineal y los resultados para cada modelo estuvieron organizados en tres tablas (Ver Anexos 2-25). A manera de ejemplo se muestra los resultados obtenidos del modelo 1: $V=b_0 + b_1dap$.

Tabla 7: Estadísticas de la regresión

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
<i>Coefficiente de correlación múltiple</i>	0,93912201
<i>Coefficiente de determinación R²</i>	0,88195016
<i>R² ajustado</i>	0,88074557
<i>Error típico</i>	2,33396175
<i>Observaciones</i>	100

Tabla 8: Análisis de Varianza

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
<i>Regresión</i>	1	3988,34005	3988,34005	732,15783	2,905E-47
<i>Residuos</i>	98	533,842989	5,44737744		
<i>Total</i>	99	4522,18304			

Tabla 9: Determinación del intercepto y coeficientes de la ecuación.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
<i>Intercepción</i>	-9,512600	0,727209	-13,0809568	3,19518E-23	-10,95572458	-8,069476114
<i>Variable X 1</i>	16,62651	0,614467	27,0584151	2,90484E-47	15,40712703	17,84590871

Por lo tanto, tomando en cuenta los coeficientes estimados de la Tabla 9, se obtiene la siguiente ecuación para el modelo 1: $V= -9,5126003 + 16,6265179dap$.

Luego, se procedió a analizar los criterios estadísticos determinantes de cada ecuación ya mencionados en la metodología, y el resultado que se obtuvo es el siguiente:

a) **Coefficiente de determinación (R^2):**

La Tabla 10 muestra las 24 ecuaciones obtenidas y su respectivo R^2 .

Tabla 10: Ecuaciones y Coeficiente de Determinación.

Modelo	Ecuaciones	R^2	Condición
1	$V = -9,5126 + 16,6265dap$	0,882	Aceptado
2	$V = -44514 + 0,9624daph$	0,892	Aceptado
3	$V = -0,5714 + 6,9219dap^2$	0,907	Aceptado
4	$V = 0,3205 + 0,4887dap^2h$	0,972	Aceptado
5	$V = -6,1055 + 1,2476h$	0,291	Rechazado
6	$V = -1,4821 + 1,6394dap + 6,2602dap^2$	0,907	Aceptado
7	$V = -6,5826 + 6,3202dap^2 + 0,5615h$	0,959	Aceptado
8	$V = -13,8565 + 15,2001dap + 0,4868h$	0,920	Aceptado
9	$V = 2,2078 + 1,2528daph - 0,8811h$	0,956	Aceptado
10	$V = 1,213 - 0,0893h + 0,4996dap^2h$	0,973	Aceptado
11	$V = -1,3717 + 2,6034dap + 0,4206dap^2h$	0,975	Aceptado
12	$V = 0,0066 + 1,3219dap^2 + 0,4033dap^2h$	0,975	Aceptado
13	$V = 0,8755 - 0,0982daph + 0,5348dap^2h$	0,972	Aceptado
14	$V = -3,2615 + 3,8731dap^2 + 0,4947daph$	0,967	Aceptado
15	$V = -1,0185 + 1,87dap^2 + 0,0895h + 0,4569dap^2h$	0,976	Aceptado
16	$V = 0,9679 - 8,2823dap + 6,8643dap^2 + 0,5547daph$	0,974	Aceptado
17	$V = -0,2509 + 0,4626dap + 1,1399dap^2 + 0,4033dap^2h$	0,975	Aceptado
18	$V = -0,9581 + 2,4456dap - 0,055daph + 0,4506dap^2h$	0,975	Aceptado
19	$V = -4,2737 - 4,8099dap + 8,2254dap^2 + 0,5954h$	0,961	Aceptado
20	$V = -2,4383 + 0,5917daph + 3,4347dap^2 - 0,1307h$	0,968	Aceptado
21	$V = -1,1075 + 2,4527dap - 0,0166h + 0,4266dap^2h$	0,975	Aceptado
22	$V = 0,1785 - 2,5185dap + 0,1881daph + 3,0145dap^2 + 0,2716dap^2h$	0,976	Aceptado
23	$V = -0,88654 - 0,4556dap + 0,0983h + 2,1029dap^2 + 0,3527dap^2h$	0,976	Aceptado
24	$V = 0,1216 - 2,4138dap + 0,1783daph + 2,9703dap^2 + 0,0055h + 0,2756dap^2h$	0,976	Aceptado

La principal observación es que solo la ecuación 5, que presenta a la altura como única variable independiente ($V = b_0 + b_1h$), posee un R^2 inferior a 0,75 ($R^2 = 0,29$), por lo que es eliminado para los futuros análisis. Bautista (200) y Ruiz (2007), muestran que los R^2 obtenidos en el mismo modelo representan los valores más bajos de sus respectivos

estudios, por lo que se refuerza la hipótesis de que si bien la altura es un factor importante para la determinación del volumen, ésta por sí sola no determina con precisión el volumen de un árbol.

Los 23 modelos restantes presentan un buen ajuste, el que se ve reflejado en los coeficientes de determinación altamente significativos (entre 0,88 y 0,98) obteniendo los mejores valores en las ecuaciones con una mayor cantidad de variables independientes. Barrena et al. (1986) explican que es lógico que R^2 aumente con el número de variables independientes utilizadas, puesto que la variabilidad de la variable dependiente es explicada entonces por un mayor número de variables; pero esto no significa que la estimación de la variable dependiente sea mejor.

b) Prueba de significancia de las variables (Prueba F).

Los resultados obtenidos en la prueba de Fisher (F) son los que se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11: Prueba estadística F.

<i>Modelo</i>	<i>Estadístico F</i>		<i>Condición</i>
	<i>F</i>	<i>p-valor</i>	
1	732,16	2,90E-47	Aceptado
2	808,32	3,92E-49	Aceptado
3	951,67	2,91E-52	Aceptado
4	3368,32	1,07E-77	Aceptado
6	472,59	9,73E-51	Aceptado
7	1124,93	7,76E-68	Aceptado
8	555,67	7,45E-54	Aceptado
9	1045,46	2,33E-66	Aceptado
10	1729,87	1,36E-76	Aceptado
11	1854,05	5,14E-78	Aceptado
12	1903,22	1,49E-78	Aceptado
13	1706,87	2,55E-76	Aceptado
14	1412,29	1,89E-72	Aceptado
15	1277,70	3,27E-77	Aceptado
16	1191,41	8,60E-76	Aceptado
17	1256,92	7,04E-77	Aceptado
18	1232,79	1,74E-76	Aceptado
19	787,76	1,90E-67	Aceptado
20	960,86	1,93E-71	Aceptado
21	1224,54	2,39E-76	Aceptado
22	950,10	1,16E-75	Aceptado
23	949,02	1,23E-75	Aceptado
24	752,08	3,83E-74	Aceptado

Da Cunha (2009) expresa que cuanto mayor es la variación explicada por el modelo y menor es la variación por el error, mayor será el valor de F indicando que el modelo tiene un mejor ajuste. Bajo este supuesto, se puede deducir que la ecuación que presenta el mejor ajuste es aquella representada por modelo 4 (F=3368,32), seguido por las ecuación del modelo 12 (F=1903,22) y la ecuación del modelo 11 (F=1854,05).

Es importante mencionar que no se rechazó ninguna ecuación, ya que las 23 ecuaciones son significativas al 95% de confianza. Esto se determinó porque el p-valor presentó un valor inferior a 0,05 en todos los casos; por lo que existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula (H0), afirmando que sí existe una regresión lineal de “y” en función de “x”.

c) Prueba de significancia de los coeficientes del modelo de regresión.

Los resultados de probabilidad de ocurrencia del estadístico *t* son mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12: Prueba estadística t-Student.

<i>Modelo</i>	<i>p- valor (t-Student)</i>					<i>Condición</i>
	<i>b₁</i>	<i>b₂</i>	<i>b₃</i>	<i>b₄</i>	<i>b₅</i>	
1	2,90E-47					Aceptado
2	3,92E-49					Aceptado
3	2,91E-52					Aceptado
4	1,07E-77					Aceptado
6	0,584549	1,67E-06				Rechazado
7	1,11E-61	7,37E-19				Aceptado
8	1,10E-47	1,05E-09				Aceptado
9	3,33E-60	1,74E-20				Aceptado
10	0,062313	1,92E-70				Rechazado
11	0,001575	4,73E-34				Aceptado
12	0,000418	1,24E-29				Aceptado
13	0,136373	1,70E-30				Rechazado
14	1,30E-26	7,06E-24				Aceptado
15	1,19E-03	0,203802	1,38E-12			Rechazado
16	5,09E-06	1,39E-17	3,31E-28			Aceptado
17	0,766467	0,112026	2,68E-29			Rechazado
18	0,003732	0,396031	2,78E-18			Rechazado
19	0,019477	1,05E-16	8,15E-20			Aceptado
20	1,09E-06	3,42E-08	0,3543			Rechazado
21	0,010539	0,757735	1,14E-25			Rechazado
22	0,362912	0,194029	0,062381	0,010101		Rechazado
23	0,79046	0,20857	0,045875	2,74E-11		Rechazado
24	0,701352	0,746309	0,30334	0,985206	0,257963	Rechazado

Los resultados muestran la probabilidad de que el valor obtenido para t ocurra por azar, dentro de una situación en el que al menos un coeficiente sea igual a cero (Vélez, 2013). Bajo este supuesto y con un nivel de confianza del 95%, se rechazaron 11 ecuaciones que presentaron un p-valor mayor a 0,05 en alguno de sus coeficientes estimados, ya que no existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula (H_0), afirmando que algún coeficiente es estadísticamente igual a cero. De esta manera, solo 12 ecuaciones son aceptadas para los análisis estadísticos posteriores.

Uriel (2013) menciona que cuando las ecuaciones solo presentan una variable independiente, los valores de probabilidades de t y F son exactamente las mismas, siempre y cuando la hipótesis alternativa sea de dos colas. Esta afirmación se cumple en las ecuaciones 1,2, 3 y 4; que son aquellas que solo presentan una variable independiente.

d) Análisis de los residuos.

A partir de los gráficos de análisis de residuos de las 12 ecuaciones seleccionadas, mostradas en las Figuras 12 - 23, se aprecia de manera general que no existe una homogeneidad de variancias de los errores en función del volumen estimado en ninguna ecuación. Estos resultados nos indican que debe realizarse una regresión ponderada para obtener una mejor estimación de los coeficientes (Barrena, 1988).

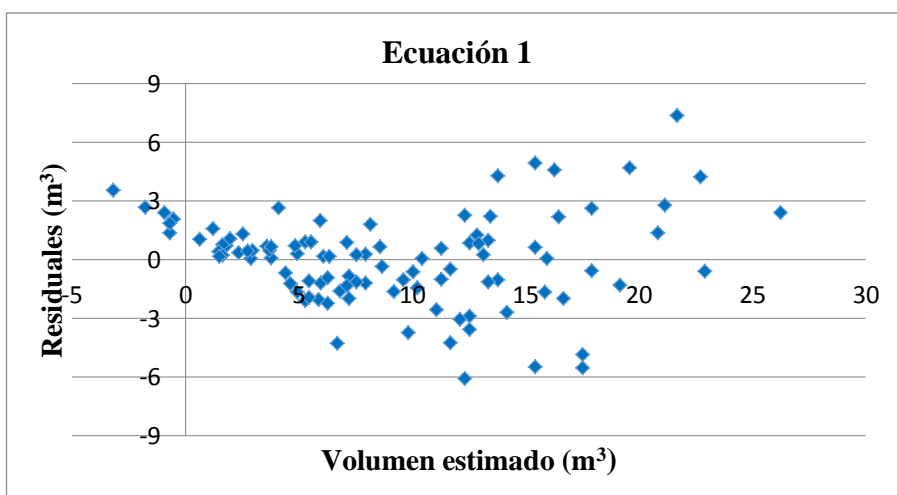


Figura 12: Análisis de residuos de la ecuación 1.

FUENTE: Elaboración propia

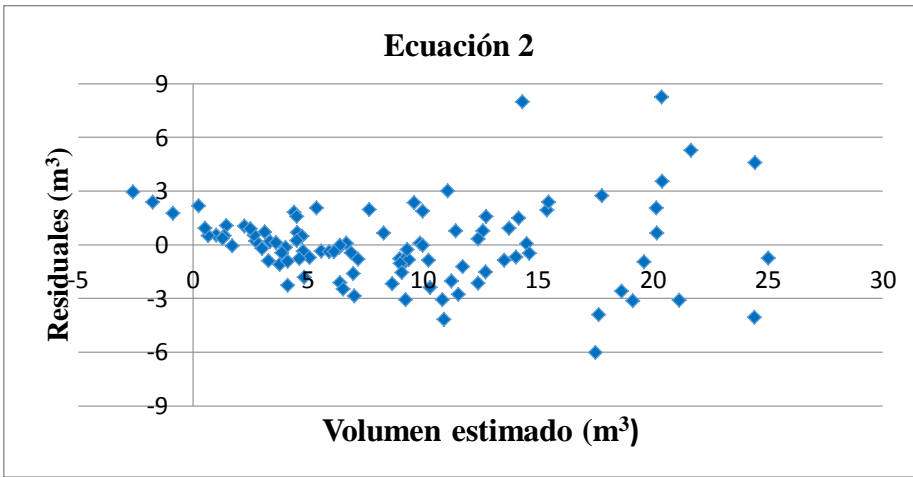


Figura 13: Análisis de residuos de la ecuación 2.

FUENTE: Elaboración propia

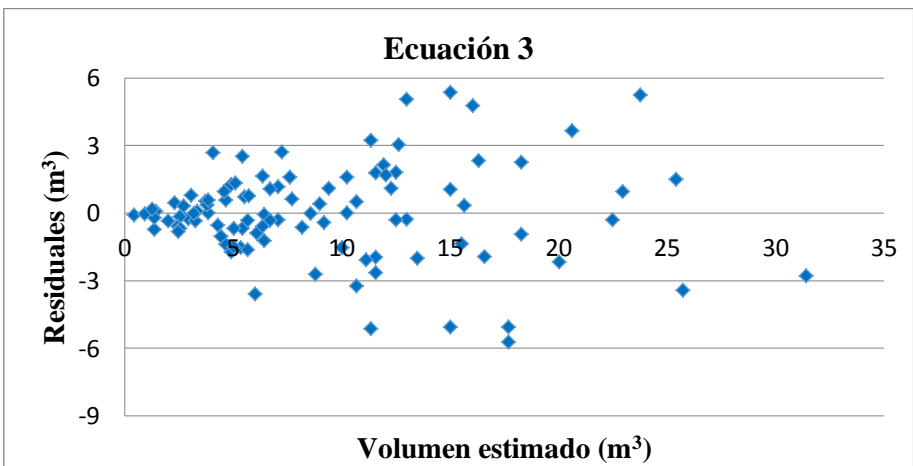


Figura 14: Análisis de residuos de la ecuación 3.

FUENTE: Elaboración propia

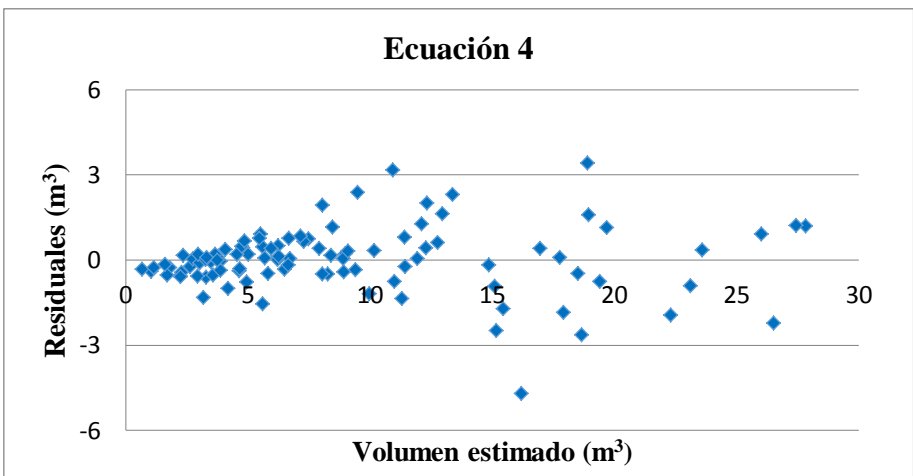


Figura 15: Análisis de residuos de la ecuación 4.

FUENTE: Elaboración propia

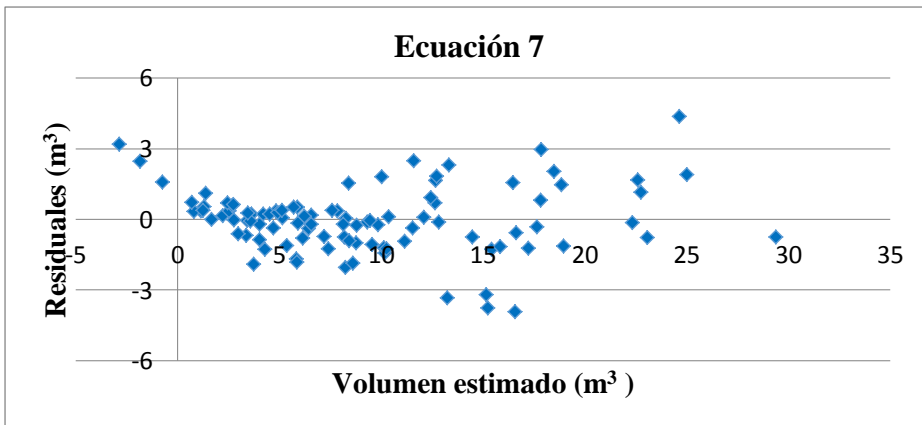


Figura 16: Análisis de residuos para la ecuación 7.

FUENTE: Elaboración propia

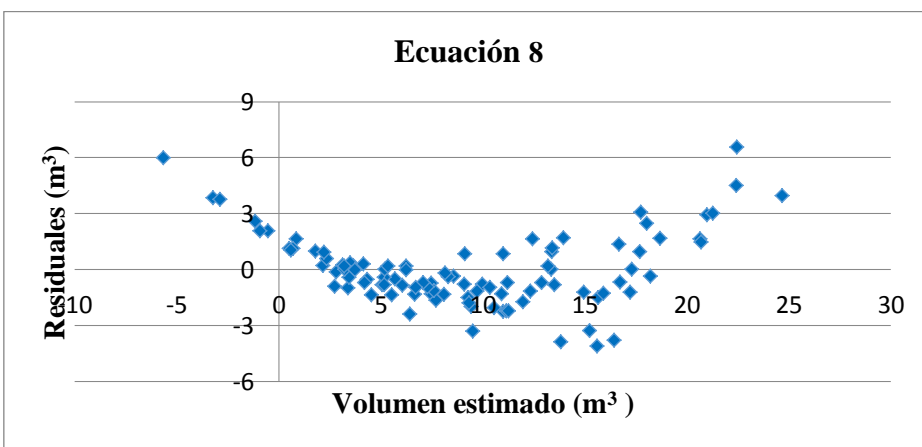


Figura 17: Análisis de residuos para la ecuación 8.

FUENTE: Elaboración propia

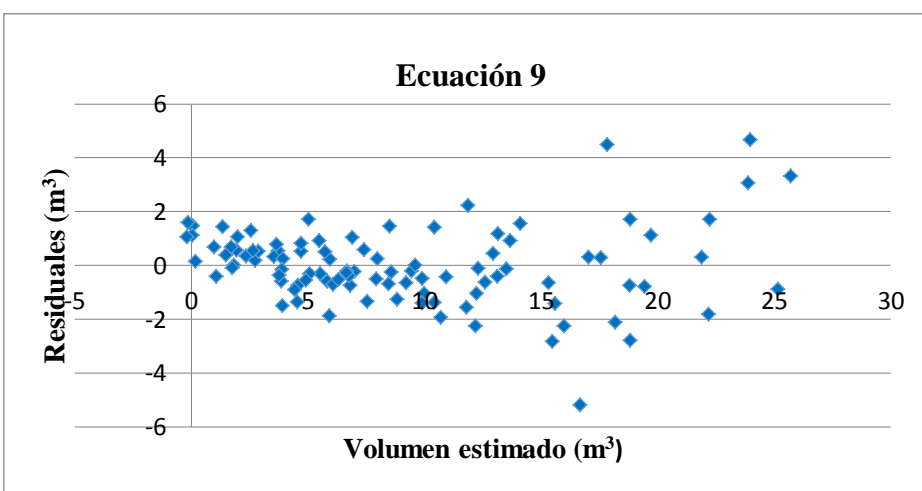


Figura 18: Análisis de residuos para la ecuación 9.

FUENTE: Elaboración propia

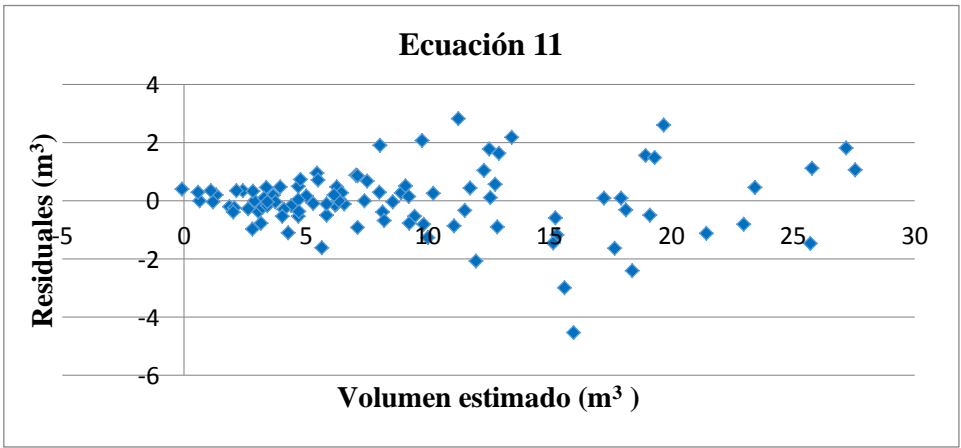


Figura 19: Análisis de residuos para la ecuación 11.

FUENTE: Elaboración propia

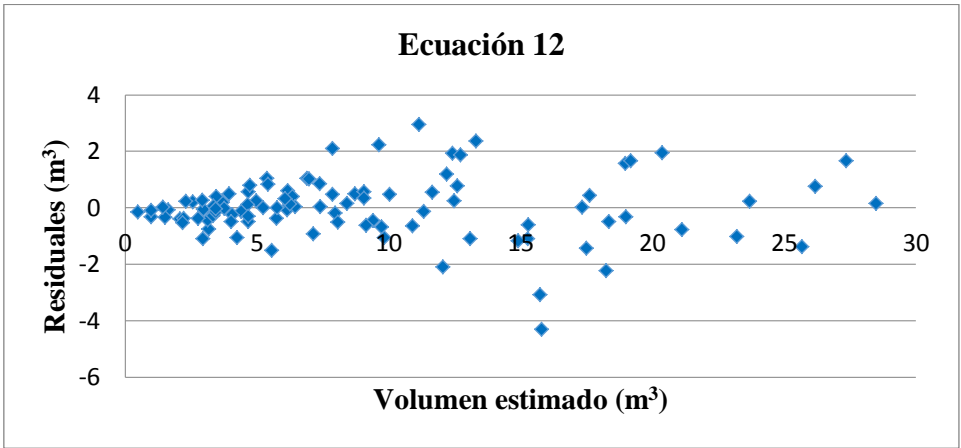


Figura 20: Análisis de residuos para la ecuación 12.

FUENTE: Elaboración propia

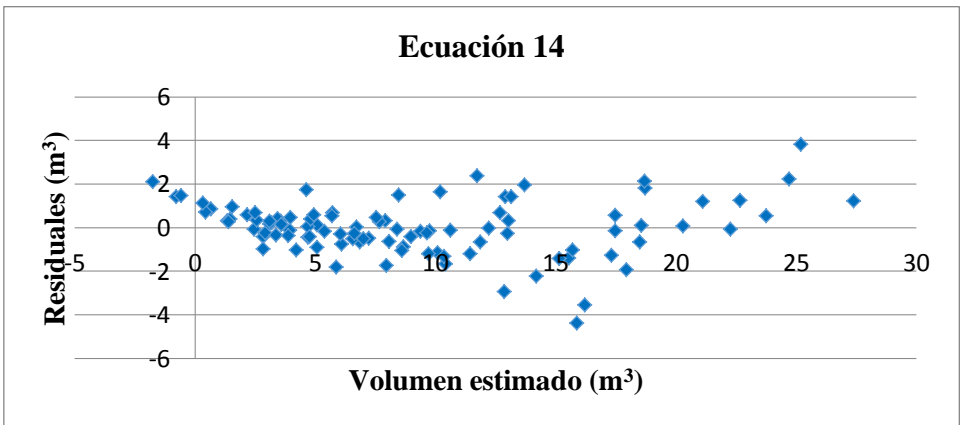


Figura 21: Análisis de residuos para la ecuación 14.

FUENTE: Elaboración propia

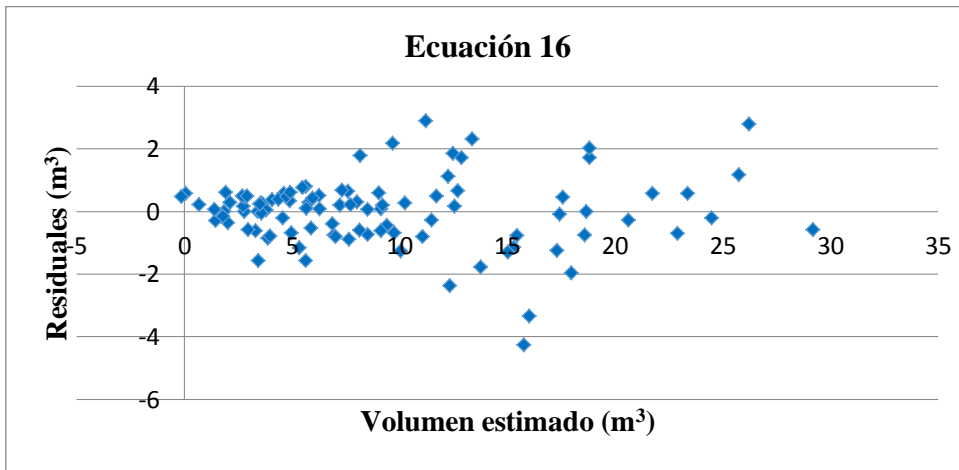


Figura 22: Análisis de residuos para la ecuación 16.

FUENTE: Elaboración propia

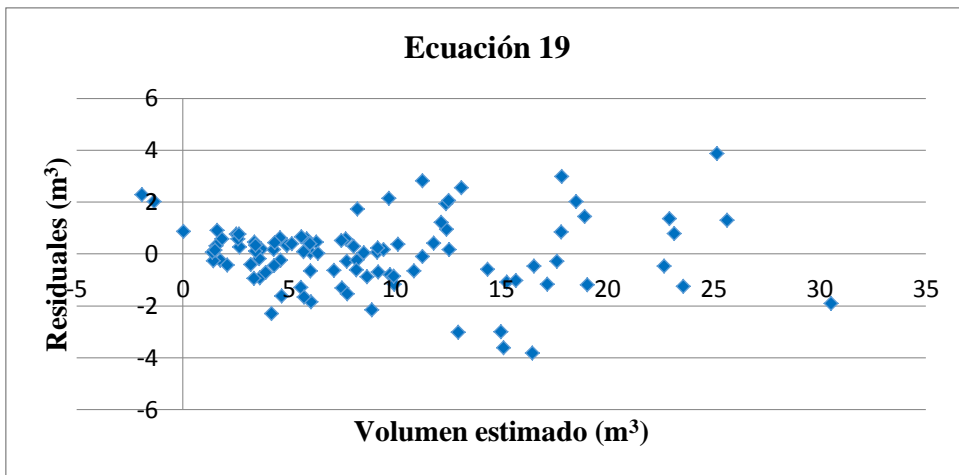


Figura 23: Análisis de residuos para la ecuación 19.

FUENTE: Elaboración propia

Montgomery, et al. (2006) señalan que existen tipos frecuentes de inadecuaciones del modelo. En nuestros resultados se puede observar dos clases de patrones: “forma de embudo abierto hacia fuera” y “no lineal”. La forma “no lineal” mostradas en las figuras de los modelos 1, 2, 7, 8, 9, 14 y 19 son gráficas con tendencia curva que indica no linealidad, lo que podría indicar que se necesitan otras variables independientes en los modelos. Las figuras de los modelos 3, 4, 11, 12 y 16 son las que representan a la forma “embudo abierto hacia afuera”, lo que implica que la varianza es función creciente de la variable dependiente. El mismo autor señala que los modelos de regresión lineal con varianza de error no

constante se pueden ajustar con el método de los mínimos cuadrados ponderados. Por ello, se realizó la regresión ponderada a las 12 ecuaciones seleccionadas previamente.

2.3. ANÁLISIS DE REGRESIÓN PONDERADA

Se utilizaron 13 factores de ponderación en los modelos que solo consideran el dap como variable independiente (Modelos 1 y 3) y 48 factores de ponderación para los modelos que poseen la combinación de las variables dap y altura como variables independientes (Modelos 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 16, 19).

Los factores de ponderación ($\frac{1}{K}$) para los modelo 1 y 3 son:

$$\frac{1}{dap^{0,2}}; \frac{1}{dap^{0,5}}; \frac{1}{dap^{0,7}}; \frac{1}{dap^{0,9}}; \frac{1}{dap^1} \frac{1}{dap^{1,2}}; \frac{1}{dap^{1,5}}; \frac{1}{dap^{1,7}}; \frac{1}{dap^{1,9}}; \frac{1}{dap^2};$$

$$\frac{1}{dap^{2,5}}; \frac{1}{dap^3} \text{ y } \frac{1}{dap^4}$$

Los factores de ponderación ($\frac{1}{K}$) para los modelos 2, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 16 19 son:

$$\frac{1}{dap^{0,2}}; \frac{1}{dap^{0,5}}; \frac{1}{dap^{0,7}}; \frac{1}{dap^{0,9}}; \frac{1}{dap} \frac{1}{dap^{1,2}}; \frac{1}{dap^{1,5}}; \frac{1}{dap^{1,7}}; \frac{1}{dap^{1,9}}; \frac{1}{dap^2}; \frac{1}{dap^{2,5}}; \frac{1}{dap^3};$$

$$\frac{1}{dap^4}; \frac{1}{h}; \frac{1}{h^2}; \frac{1}{h^4}; \frac{1}{daph^{0,2}}; \frac{1}{daph^{0,5}}; \frac{1}{daph^{0,7}}; \frac{1}{daph^{0,9}}; \frac{1}{daph} \frac{1}{daph^{1,2}}; \frac{1}{daph^{1,5}}; \frac{1}{daph^{1,7}};$$

$$\frac{1}{daph^{1,9}}; \frac{1}{daph^2}; \frac{1}{daph^{2,5}}; \frac{1}{(dap^2h)^{0,2}}; \frac{1}{(dap^2h)^{0,5}}; \frac{1}{(dap^2h)^{0,7}}; \frac{1}{(dap^2h)^{0,9}}; \frac{1}{(dap^2h)};$$

$$\frac{1}{(dap^2h)^{1,2}}; \frac{1}{(dap^2h)^{1,5}}; \frac{1}{(dap^2h)^{1,7}}; \frac{1}{(dap^2h)^{1,9}}; \frac{1}{(dap^2h)^2}; \frac{1}{(dap^2h)^{2,5}}; \frac{1}{(dap^2h)^3};$$

$$\frac{1}{(dap^2h)^4}; \frac{1}{dap^{0,2}h}; \frac{1}{dap^{0,5}h}; \frac{1}{dap^{0,7}h}; \frac{1}{dap^{0,9}h}; \frac{1}{dap^{1,2}h}; \frac{1}{dap^{1,5}h}; \frac{1}{dap^{1,7}h} \text{ y } \frac{1}{dap^2h^2}.$$

Los nuevos modelos fueron sometidos al procedimiento de regresión ponderada y con ello se obtuvieron 506 nuevas ecuaciones, las cuales fueron analizadas de la misma manera que las regresiones lineales simples, es decir, se tomó en cuenta los criterios estadísticos de R^2 , prueba F, t-Student y el Análisis de residuos.

En la Tabla 13 se muestra las ecuaciones elegidas por cada modelo con su correspondiente factor de ponderación.

Tabla 13: Ecuaciones ponderadas seleccionadas.

N°	Ecuación ponderada	Factor de ponderación (1/k)	R ²	Estadístico F		valor-p (t-Student)	Condición
				F	Valor p		
3	$\frac{V}{dap^{1,2}} = \frac{-0,693319}{dap^{1,2}} + \frac{7,016477dap^2}{dap^{1,2}}$	1/dap ^{1,5}	0,9583	1127,5	6,96E-68	**	Aceptado
4	$\frac{V}{(dap^2h)^{1,2}} = \frac{-0,0468}{(dap^2h)^{1,2}} + \frac{0,51644dap^2h}{(dap^2h)^{1,2}}$	1/(dap ² h) ^{1,2}	0,9863	3533,1	2,40E-91	**	Aceptado
11	$\frac{V}{dap^{1,5}h} = \frac{-0,366}{dap^{1,5}h} + \frac{0,790dap}{dap^{1,5}h} + \frac{0,479dap^2h}{dap^{1,5}h}$	1/dap ^{1,5} h	0,9879	2639,2	4,60E-92	**	Aceptado
12	$\frac{V}{dap^{1,5}h} = \frac{-0,110787}{dap^{1,5}h} + \frac{0,6516dap^2}{dap^{1,5}h} + \frac{0,465dap^2h}{dap^{1,5}h}$	1/dap ^{1,5} h	0,9879	2650,5	3,70E-92	**	Aceptado
16	$\frac{V}{daph} = \frac{1,484}{daph} + \frac{8,51dap}{daph} + \frac{7,176dap^2}{daph} + \frac{0,50daph}{daph}$	1/daph	0,9869	1813,4	9,50E-89	**	Aceptado

** Alto nivel de significancia (p-valor<0,05).

El análisis de residuos fue determinante para seleccionar los modelos que no cumplen con la homogeneidad de varianzas (homocedasticidad). Así, las ecuaciones ponderadas de los modelos 1, 2, 7, 8, 9, 14 y 19 fueron rechazadas en su totalidad, ya que a pesar de cumplir con los parámetros anteriormente analizados, no lograron homogenizar la varianza de sus residuos con ningún factor de ponderación. Las ecuaciones ponderadas de los modelos 3, 4, 11, 12 y 16 si lograron homogenizar la varianza de sus residuos con los pesos mostrados en la Tabla 13, y esto se determinó porque las gráficas muestran que no existe una tendencia

de los puntos de la variable dependiente, demostrando una distribución homogénea de los residuos a lo largo del eje de la variable estimada. Estos resultados pueden observarse completos en los Anexos 26-30.

El Coeficiente de Determinación (R^2) indica que las ecuaciones elegidas presentan un buen ajuste, ya que son mayores a 0,958. Las ecuaciones que presenta el mayor R^2 son las correspondientes a los modelos 11 y 12 ($R^2=0,9879$). Es importante mencionar que estos valores son superiores en todos los casos a los R^2 de las ecuaciones sin ponderar, lo que podría indicar que el ajuste es mejor en las ecuaciones ponderadas.

La ecuación del modelo 4 presenta el valor más alto del estadístico F ($F=3533,13$). En las 5 ecuaciones, el valor crítico de F o p-valor es superior a 0,05 ($\alpha>0,05$) por lo que se determina que a un 95% de confianza, existe suficiente estadística para rechazar la hipótesis nula (H_0), afirmando que si existe significancia de las variables de regresión.

De la misma manera, el p-valor (estadístico t) de los coeficientes estimados de las ecuaciones elegidas es superior a 0,05; por lo que se afirma que a un 95% de confianza, existe suficiente estadística para rechazar la hipótesis nula (H_0), afirmando que los coeficientes estimados de las 5 ecuaciones son estadísticamente diferentes de cero.

Es importante mencionar que en el presente estudio no se cumple con lo propuesto por Flores (1995), que hace referencia a que el factor de ponderación más adecuado (cuando el volumen está en función del dap y de la altura) suele ser el dap al cuadrado por la altura, todo elevado al cuadrado ($\frac{1}{(dap^2h)^2}$), ya que en ningún caso este factor de ponderación logró ser el más óptimo dentro de cada modelo. Sin embargo, Barrena (1988) menciona que el factor de ponderación cambia de acuerdo a como el volumen se relaciona con las variables explicativas, por lo que se puede inferir que nuestros datos en su mayoría, responden mejor a ecuaciones ponderadas con un peso de $\frac{1}{dap^{1,5}h}$.

3. ELECCIÓN DE LA MEJOR ECUACIÓN

3.1. ÍNDICE DE FURNIVAL

Para elegir la mejor ecuación, se calculó y comparó el Índice de Furnival (IF) de las cinco ecuaciones escogidas anteriormente y se seleccionó aquella ecuación que presentó el menor IF. Los resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14: Índice de Furnival para la selección de la mejor ecuación.

N°	Ecuación ponderada	\sqrt{S}	Antilog (1/n ΣLogp)	IF = \sqrt{S} *Antilog (1/n ΣLogp)
3	$\frac{V}{dap^{1,5}} = \frac{-0,693319}{dap^{1,5}} + \frac{7,016477dap^2}{dap^{1,5}}$	1,4296	1,08392	1,549660
4	$\frac{V}{(dap^2h)^{1,2}} = \frac{-0,046866}{(dap^2h)^{1,2}} + \frac{0,5164482dap^2h}{(dap^2h)^{1,2}}$	0,0372	22,06232	0,821950
11	$\frac{V}{dap^{1,5}h} = \frac{-0,366993}{dap^{1,5}h} + \frac{0,790272dap}{dap^{1,5}h} + \frac{0,479625dap^2h}{dap^{1,5}h}$	0,0607	12,82460	0,779592
12	$\frac{V}{dap^{1,5}h} = \frac{-0,110787}{dap^{1,5}h} + \frac{0,651536dap^2}{dap^{1,5}h} + \frac{0,465085dap^2h}{dap^{1,5}h}$	0,0606	12,82460	0,777941
16	$\frac{V}{daph} = \frac{1,484042}{daph} + \frac{8,517915dap}{daph} + \frac{7,176401dap^2}{daph} + \frac{0,5019daph}{daph}$	0,0708	12,48470	0,884126

En los resultados se muestra que el menor IF (0,777941) pertenece a la ecuación ponderada del modelo 12. El siguiente paso fue multiplicar cada variable de la ecuación elegida por la inversa de su factor de ponderación (K) respectivo, como se muestra a continuación:

$$\left(\frac{V}{dap^{1,5}h}\right) dap^{1,5}h = dap^{1,5}h \left(\frac{-0,110787 + 0,651536dap^2 + 0,465085dap^2h}{dap^{1,5}h}\right)$$

De esta manera, se obtuvo la ecuación que estima mejor el volumen de los individuos de caoba de Ucayali, la cual es la siguiente:

$$V = -0,110787 + 0,651536dap^2 + 0,465085dap^2h$$

Para corroborar la precisión de la ecuación elegida, ésta se utilizó para determinar el volumen estimado de la muestra (100 árboles de caoba de Ucayali). Con los resultados se determinó que el volumen promedio estimado es de $9,180 \text{ m}^3$, sobrestimando en $0,056 \text{ m}^3$ al volumen promedio real (0,618%).

Además se realizó un gráfico comparativo de los volúmenes estimados versus los volúmenes reales, el cual se muestra en la Figura 24. Se observa que ambos volúmenes presentan tendencia lineal y que la mayor diferencia se volúmenes se da a medida que se incrementa la variable independiente, en este caso el dap^2 . Ante ello, se infiere que la ecuación escogida presenta un mejor ajuste en árboles con diámetros pequeños. Asimismo, se realizó un análisis de los errores generados por la ecuación elegida en relación al volumen real y se obtuvo como resultado que el promedio de ellos es de $-0,05 \text{ m}^3$, con una varianza de $1,11 \text{ m}^3$.

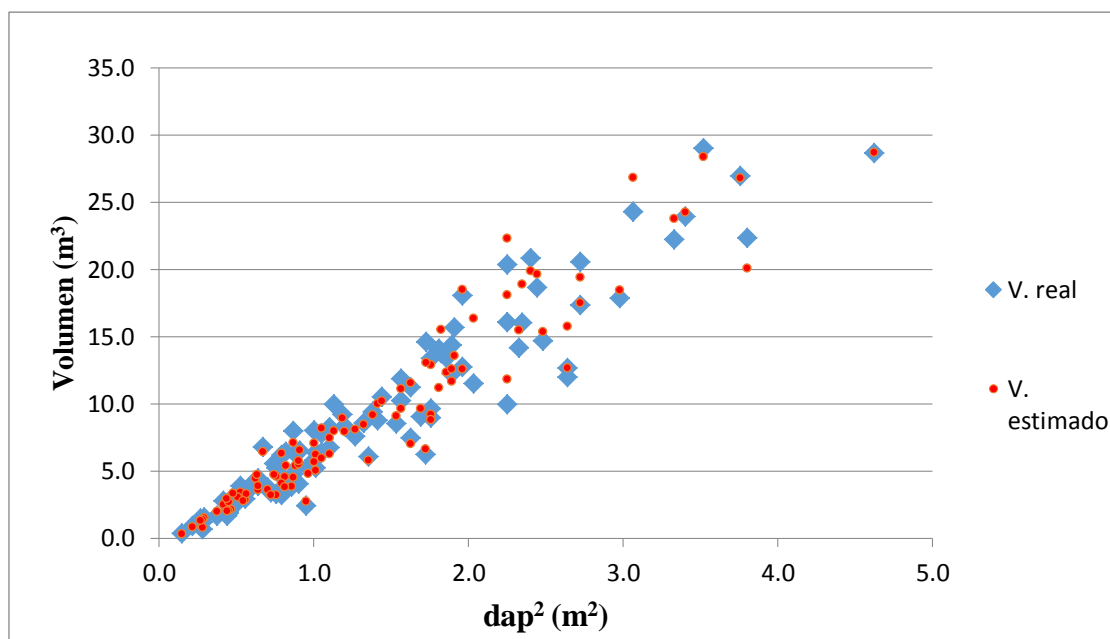


Figura 24: Volumen real versus volumen estimado de árboles de caoba de Ucayali

FUENTE: Elaboración propia

Finalmente, se puede inferir que la ecuación ponderada seleccionada es eficiente y presenta un buen ajuste en la estimación de volúmenes de árboles en pie de caoba del departamento de Ucayali, donde las únicas variables que se toma en cuenta son el diámetro y la altura del fuste, variables de fácil medición en campo.

V. CONCLUSIONES

- 1) Las ecuaciones de volumen permiten una estimación precisa de árboles en pie de caoba (*Swietenia macrophylla* King) del departamento de Ucayali.
- 2) La ecuación del volumen que estima con mayor precisión los árboles de caoba en el departamento de Ucayali es:

$$V = -0,110787 + 0,651536dap^2 + 0,465085dap^2h$$

- 3) La ecuación elegida representa una referencia adecuada para calcular los volúmenes esperados de árboles individuales de caoba del departamento de Ucayali, ya que presenta una ligera de sobreestimación (0,62%) del volumen promedio de la muestra evaluada.
- 4) Las regresiones ponderadas mejoran las estimaciones de volumen de árboles en pie de caoba en el departamento de Ucayali.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de la metodología de medición de diámetros a diferentes alturas para estimar el volumen de los árboles, ya que genera los datos necesarios para la construcción de ecuaciones de volumen.
- Es necesario analizar diversos modelos de ecuaciones de volumen para validar la calidad de los modelos seleccionados y proveer de una mayor confiabilidad a las ecuaciones de volumen generadas por dichos modelos.
- Si se quiere obtener un buen ajuste en la elaboración de ecuaciones de volumen, es recomendable utilizar la regresión ponderada.
- Se recomienda realizar más estudios de estimación de volumen de árboles de caoba en diferentes departamentos del Perú, así como también de especies con alto valor comercial, como cedro, shihuahuaco, entre otros

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alea, V; Guillén, M; Muñoz, C; Maqueda, I; Torrelles, E; Viladomiu, N. 2005. Manual de SPSS (en línea). Barcelona, ES. Consultado 15 may. 2016. Disponible en http://www.ub.edu/aplica_infor/spss/
- Acuña, E. 2010. Análisis estadísticos de datos usando MINITAB (en línea). Puerto Rico, PR. Consultad 15 may. 2016. Disponible en <http://academic.uprm.edu/eacuna/covertex.pdf>
- Alvarado, J; Obagi, J. 2008. Inferencia Estadística. Bogotá, CO. Editorial Pontificia Universidad Javeriana. 358 p.
- Aguayo, M. 2007. Correlación y regresión lineal simple (en línea). Docuweb FABIS no. 0702005. Consultado 17 may. 2016. Disponible en: http://www.fabis.org/html/archivos/docuweb/contraste_hipotesis_3r.pdf
- Barrena, V; Dancé, J. Sáenz, D. 1986. Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. Lima, PE. Revista Forestal del Perú 13(2): 3-12.
- _____. 1988. La regresión ponderada en la elaboración de las ecuaciones de volumen. Lima, PE. Revista Forestal del Perú 15(2): 21-28.
- _____. 1990. Estimaciones del volumen de árboles de la Amazonia Peruana a partir de ecuaciones de ahusamiento. Tesis (Mg. Sc Ciencias Forestales). Québec, Canada, CA. Universidad Laval. 116 p.
- _____; Llerena, C. 1988. La influencia de los errores de la estimación de altura en el cálculo del volumen. Revista Forestal Del Perú. Lima, PE. 15(1): 21-23.
- _____; Vargas, C. 2004. Informe de la Autoridad Científica CITES: La Caoba en el Perú. Lima, PE. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional Agraria La Molina. 31p.
- _____; Garnica, C.; Ocaña, J; Rosero, J. 2008. Instructivo de campo: Brigada de Forma y Volumen. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 13p.

- Bautista, C. 2000. Estimación el volumen de un rodal cultivado usando índices de forma. Tesis (Ing. Forestal). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 63p.
- BCRP (Banco Central de Reserva del Perú, PE). 2016. Caracterización del departamento de Ucayali (en línea). Lima, PE. Consultado 03 nov. 2016. Disponible en: <http://www.bcrp.gob.pe/docs/Sucursales/Iquitos/ucayali-caracterizacion.pdf>
- BIODAMAZ (Proyecto de Diversidad Biológica en la Amazonía Peruana, PE). Estrategia Regional de la Diversidad Biológica de Ucayali (en línea). Ucayali, PE. Consultado 03 nov. 2016. Disponible en: <https://www.cbd.int/doc/nbsap/sbsap/pe-sbsap-ucayali-es.pdf>
- Cailliez, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Vol. 2. Roma, IT. Estudios FAO Montes. 22/1. 92p.
- Cancino, J. 2006. Dendrometría básica. Concepción, CL. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Concepción. 171p.
- Chatterjee, S; Price, B. 1977. Regression analysis by example. New York, USA. s.e. 68p.
- CPM (Confederación Peruana de la Madera, PE). 2008. Compendio de Información Técnica de 32 Especies Forestales. 2da Ed. Lima, PE. CITEMadera. 73p.
- Cunia, T. 1964. Weighted least square method and construction of volume tables. Forest Sci. 10(2): 180-191.
- Cuñachi, s.f. Manual práctico de cubicación de madera rolliza- aserrada (en línea). Lima, PE. Consultado 11 may. 2016. Disponible en: http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/3033/Technical/TFL-SPD-030-12-R1-M-Manual-Practico-CubicacionMaderaRollizayAserrada.pdf
- Da Cunha, T; Vargas, J; Escalier, M. 2009. Ajuste y selección de modelos de regresión para estimar el volumen total de árboles (en línea). Proyecto FOMABO, BO. Consultado 15 may. 2016. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/236657148>
- _____ ; Guimaraes, C. 2009. Modelo de regresión para estimar el volumen total con corteza de árboles de *Pinus taeda* L. en el sur de Brasil. Kurú: Revista Forestal 6(16): 1-15.

- Escobar, M. 2015. Estudio de la volumetría de árboles en pie de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el departamento de Madre de Dios, Perú. Tesis (Ing. Forestal). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. En prensa.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1974. Manual del inventario forestal con especial referencia a los bosques tropicales mixtos. Roma, IT. 195p.
- _____. 1981. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Roma, IT. 117p.
- Flores, C. 1995. Ecuación del volumen de una población ribereña de *Cedrela odorata* en Madre de Dios – Perú. Revista Forestal del Perú 22(1-2): 15-26.
- Furnival, G. 1961. An Index for comparing equations used in constructing volumes tables. Forest Science no. 7(4): 337-341.
- García, O. 1995. Apuntes de Mensura Forestal (en línea). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, CL. Consultado 10 may. 2016. Disponible en: <http://web.unbc.ca/~garcia/unpub/mensura.pdf>
- Guillén, R. 2014. Estimación del volumen de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) usando ecuaciones de ahusamiento para el departamento de Madre de Dios. Tesis (Ing. Forestal). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 99p.
- Gujarati, D. 1992. Econometría Básica. 2 ed. México D.F. MX. McGraw-Hill. 597p.
- Hanke, J; Wichern, D. 2006. Pronóstico en los negocios. 8 ed. Naucalpan de Juárez. MX. Prentice Hall. 552p.
- IIAP (Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana, PE). 2006. Estrategia regional de la diversidad biológica de Ucayali. Ucayali, PE. 144p.
- Kometter, R; Maraví, E. 2007. Tabla de conversión para el cálculo de volúmenes de madera aserrada – caoba (*Swietenia macrophylla* King) (En línea). Lima, PE. Consultado 15 may. 2016. Disponible en: <http://siteresources.worldbank.org/EXTFORESTS/Resources/985784-1217874560960/Methodologia.pdf>
- Lamb, B. 1966. Mahogany of tropical America: Its Ecology and Management. Ann Arbor. The University of Michigan. US. 220p.

- Loetsch, F.; Zohrer, F.; Haller, H.E. 1973. Forest Inventory. Vol. 2. B.L.V. Verlagsgesellschaft. Munich, DE. 469p.
- Lojan, L. 1966. Una fórmula para estimar volúmenes en un bosque tropical húmedo. Turrialba, CR. Revista interamericana de ciencias agrícolas no. 16(1): 67-72.
- Lombardi, I.; Huerta, P. 2006. Controlando la Caoba. OIMT: Actualidad Forestal Tropical 14(3): 5-9.
- _____; Vargas, C. 2006. Informe Técnico: Fortalecimiento de las Autoridades Administrativas y Científicas CITES-Perú. Lima, PE. 28 p.
- _____; Cuba, K; Huerta, P. 2013. Las poblaciones de Caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 155p.
- Mackay, E; 1984. Dasometría, teoría y técnicas de las mediciones forestales. Madrid, ES. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. 760p.
- Malleux, J; 1982. Inventarios Forestales en Bosques Tropicales. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 414 p.
- _____; Montenegro, E. 1971. Manual de dasimetría. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 216p.
- Martínez, E. 2005. Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. Anuario Jurídico y Económico Escurialense no. 38: 315-332.
- Mendiburu, F. s.f. Análisis de Regresión y Correlación (en línea). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, PE. Consultado 12 ago. 2016. Disponible en: <http://tarwi.lamolina.edu.pe/~fmendiburu/indexfiler/academic/Estadistica/parte6.pdf>
- MINAM (Ministerio el Ambiente del Perú, PE). 2013. Indicadores ambientales de Ucayali. Lima, PE. 155p.
- _____. 2014. Perú: Comprometido con la conservación y gestión sostenible de la caoba. Lima, PE. 10p.
- _____. 2015. Guía de Inventario de la Flora y Vegetación. Lima, PE. 49p.
- MINCETUR (Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, PE). s.f. Región Ucayali (en línea). s.l. Consultado 9 may. 2016. Disponible en: <http://www.mincetur.gob.pe/newweb/Portals/0/UCAYALI.pdf>

- Montgomery, D; Peck, A; Vining, G. 2006. Introducción al análisis de regresión lineal. 3 ed. México DF, MX. CECSA. 588 p.
- Mora, F; Gómez, M. 2003. Ecuaciones y tablas de volumen para árboles individuales en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn.) en la vertiente del pacífico de Costa Rica (en línea). Heredia, CR. Consultado 18 may. 2016. Disponible en: <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11573e/A11573e.pdf>
- OIMT (Organización Internacional de Maderas Tropicales, US). 2004. Informe del Taller sobre el desarrollo de capacidad para la aplicación del listado de la Caoba en el Apéndice II de la CITES: Racionalizando el comercio de la Caoba. Serie Técnica OIMT N° 22. 41p.
- Pecé, M.; Gaillard de Benítez, C.; Ríos, N. 1997. Tabla de Volumen para “Quebracho Colorado Santiagueño” (*Schinopsis quebracho-colorado*) utilizando el método de los Mínimos Cuadrados Ponderados. Revista Quebracho no. 5: 41-50.
- Philip, M. 1994. Measuring trees and forest. 2 ed. Cambridge, UK. CAB International. 310p.
- Prodán, M.; Peters, R.; Cox, F.; Real, P. 1997. Mensura Forestal. San José, C.R. IICA. 586p.
- Reynel, C.; Pennington, R.; Pennington, T.; Flores, C.; Daza, A. 2003. Árboles útiles de la Amazonía Peruana, un manual con apuntes de identificación, ecología y propagación de las especies. Lima, PE. Imprenta Gráfica Educativa. 48p.
- Ríos, J.; Stern, M.; León, F.; Reátegui, F. 2002. Análisis del estado de conservación de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en el Perú. Lima, PE. WWF. 99 p.
- Rojo, J. 2007. Regresión Lineal Múltiple (en línea). Madrid, ES. Consultado 11 ago. 2016. Disponible en: http://humanidades.cchs.csic.es/cchs/web_UAE/tutoriales/PDF/Regresion_lineal_multiple_3.pdf
- Romero, N. 2012. La revolución en la toma de decisiones estadísticas: el p-valor. Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales. 14 (3): 439-446.
- Ruiz, E. 2007. Elaboración de una ecuación de volumen para un bosque de terrazas alta en el Codo del Pozuzo, Puerto Inca, Huánuco. Tesis (Ing. Forestal). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 100p.

- Salazar, R. 1989. Guía para la investigación silvicultural de especies de uso múltiple. Turrialba, CR. CATIE. 130p.
- Trigoso, J.; Stern, M.; León, F.; Reátegui, F. 2002. Análisis del estado de conservación de la caoba (*Swietenia macrophylla*) en el Perú. Lima, PE. s.e. 87 p.
- Trincado, G; Gadow, K; Sandoval, V. 1997. Estimación del volumen comercial en latifoliadas. Revista Bosque 18 (1): 39-44.
- UNALM (Universidad Nacional Agraria la Molina, PE)-ITTO (The International Tropical Timber Organization, US). 2009. Estudio de las poblaciones de caoba (*Swietenia macrophylla* King) en el Perú. Lima, PE. 142p.
- Uriel, E. 2013. Contraste de hipótesis en el modelo de regresión lineal múltiple (en línea). Valencia. ES. Consultado 20 may. 2016. Disponible en: <http://www.uv.es/uriel/4%20Contraste%20de%20hipotesis%20en%20el%20modelo%20de%20regresion%20multiple.pdf>
- Vargas, J. 1987. Manual del técnico forestal: Anatomía y tecnología de la madera. Cochabamba, BO. MFA. 119p.
- Vásquez, R. 2011. Status de conservación de la caoba (*Swietenia macrophylla* King) en la región Ucayali. Tesis (Mg. Sc. en Bosques y Gestión de Recursos Forestales). Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 105p.
- Vélez, I. 2003. Apuntes de Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Administración (en línea). Bogotá, CO. Consultado 20 may. 2016. Disponible en <http://www.gacetafinanciera.com/TEORIARIESGO/regresion.pdf>
- Vilar, J. 2006. Modelos Estadísticos Aplicados (en línea). Coruña, ES. Consultado 15 may. 2016. Disponible en http://dm.udc.es/asignaturas/estadistica2/indice_res.html
- Villarroel, L. 1994. Aplicación de la regresión ponderada en la construcción de tablas de volumen (*Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*). Cochabamba, BO. PROFOR. 22p.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

DATOS DE LOS ÁRBOLES DE CAOBA EVALUADOS

N°	CÓDIGO	SECTOR	COORDENADAS		dap1 (cm)	dap2 (cm)	dap prom (cm)	HF (m)	Volumen (m ³)
			X	Y					
1	RCP-001	RCP	257067	8850391	88,00	90,00	89,00	16,00	6,178
2	RCP-002	RCP	257142	8850360	77,50	80,00	78,75	14,30	4,262
3	RCP-003	RCP	257236	8850487	82,50	102,50	92,50	8,50	3,821
4	RCP-004	RCP	260428	8851358	132,50	130,00	131,25	7,00	6,214
5	RCP-005	RCP	260406	8851380	80,00	80,00	80,00	11,00	3,871
6	RCP-006	RCP	257316	8850556	150,00	115,00	132,50	14,50	13,366
7	RCP-007	RCP	257337	8850719	110,00	85,00	97,50	5,00	2,410
8	RCP-008	RCP	257415	8850810	81,00	100,00	90,50	13,00	6,424
9	RCP-009	RCP	257470	8850650	127,50	110,00	118,75	14,00	8,770
10	RCP-010	RCP	257856	8850535	97,50	98,75	98,13	9,50	5,206
11	RCP-011	RCP	258216	8850553	160,00	170,00	165,00	14,00	20,535
12	RCP-012	RCP	257791	8850667	120,00	112,50	116,25	8,00	6,069
13	RCP-013	RCP	257939	8850882	82,50	81,25	81,88	19,50	6,758
14	RCP-014	RCP	257669	8850962	110,00	107,50	108,75	15,00	9,211
15	RCP-015	RCP	257649	8850937	102,50	85,00	93,75	12,00	6,239
16	RCP-016	RCP	257549	8850999	137,50	135,00	136,25	13,00	13,386
17	RCP-017	RCP	257531	8850963	77,00	82,00	79,50	15,00	4,177
18	RCP-018	RCP	257376	8851589	106,30	95,00	100,65	9,50	5,226
19	RCP-019	RCP	257124	8851735	78,00	82,00	80,00	12,00	4,443
20	RCP-020	RCP	257072	8851921	170,00	130,00	150,00	20,00	20,359
21	RCP-021	RCP	256780	8851859	135,00	130,00	132,50	10,00	8,947
22	RCP-022	RCP	256741	8852042	150,00	130,00	140,00	12,50	12,712
23	RCP-023	RCP	256681	8852067	95,00	91,25	93,13	10,00	4,762
24	RCP-024	RCP	256663	8852101	130,00	110,00	120,00	14,00	10,499
25	RCP-025	RCP	257992	8851201	135,00	130,00	132,50	9,50	9,622
26	RCP-026	RCP	258323	8851511	105,00	105,00	105,00	11,00	6,752
27	RCP-027	RCP	258248	8851615	117,50	95,00	106,25	14,00	9,959
28	RCP-028	RCP	258160	8851682	118,75	100,00	109,38	13,00	8,326

Continuación

N°	CÓDIGO	SECTOR	COORDENADAS		dap1 (cm)	dap2 (cm)	dap prom (cm)	HF (m)	Volumen (m ³)
			X	Y					
29	RCP-029	RCP	258073	8851590	155,00	80,00	117,50	19,00	19,545
30	RCP-030	RCP	255046	8848731	63,00	66,00	64,50	12,00	2,778
31	RCP-031	RCP	254919	8848662	150,00	125,00	137,50	13,00	14,335
32	RCP-032	RCP	254921	8848718	67,00	69,00	68,00	9,00	2,512
33	RCP-033	RCP	254815	8848694	95,00	85,00	90,00	11,00	4,369
34	RCP-034	RCP	254762	8848809	80,00	65,00	72,50	13,00	3,856
35	RCP-035	RCP	254331	8848728	155,00	155,00	155,00	16,50	20,833
36	RCP-036	RCP	254902	8848257	145,00	131,25	138,13	14,00	15,670
37	RCP-037	RCP	254866	8848413	50,00	58,00	54,00	10,50	1,539
38	LAU-001	RCP	278764	8871426	64,00	58,00	61,00	10,50	1,667
39	SCL-001	SCL	277526	8881254	86,25	87,50	86,88	12,00	5,222
40	SCL-002	SCL	277051	8881163	90,00	145,00	117,50	13,00	9,399
41	SCL-003	SCL	277354	8883325	170,00	130,00	150,00	16,00	16,064
42	SCL-004	SCL	277084	8883497	165,00	104,00	134,50	12,00	14,096
43	SCL-005	SCL	276777	8884251	210,00	180,00	195,00	10,00	22,316
44	SCL-006	SCL	276821	8884334	95,00	77,50	86,25	12,50	5,531
45	CLA 001	CLA	716395	8881086	90,63	100,00	95,32	14,30	6,481
46	CLA 002	CLA	716284	8881294	67,50	75,00	71,25	12,00	2,688
47	CLA 003	CLA	716285	8881310	66,00	72,00	69,00	14,00	3,031
48	CLA 004	CLA	716599	8881530	56,00	50,00	53,00	5,30	0,648
49	CLA 005	CLA	716752	8881562	68,00	66,00	67,00	12,00	2,386
50	CLA 006	CLA	717521	8881185	72,00	60,00	66,00	13,50	1,861
51	CLA 007	CLA	718247	8879185	40,00	36,00	38,00	5,00	0,340
52	CLA 008	CLA	717557	8879973	89,00	89,00	89,00	10,00	3,190
53	CLA 009	CLA	717714	8880445	52,00	54,00	53,00	10,00	1,162
54	CLA 010	CLA	716889	8881758	74,00	75,00	74,50	10,00	2,921
55	CLA 011	CLA	716418	8882442	100,00	110,00	105,00	13,30	8,229
56	CLA 012	CLA	718237	8880591	206,25	162,50	184,38	14,00	23,931
57	CLA 013	CLA	715183	8884153	162,50	150,00	156,25	16,00	18,655
58	CLA 014	CLA	715152	8883923	66,00	68,00	67,00	9,00	1,853
59	CLA 015	CLA	714949	8883804	48,00	45,00	46,50	8,00	0,883
60	CLA 016	CLA	714891	8883643	115,00	132,50	123,75	11,50	8,508
61	CLA 017	CLA	714651	8883490	127,50	127,50	127,50	8,00	7,438
62	CLA 018	CLA	715001	8883401	181,30	193,80	187,55	16,00	29,020
63	CLA 019	CLA	715028	8883214	206,25	181,25	193,75	14,00	26,929
64	CLA 020	CLA	715578	8882417	56,25	46,88	51,57	10,00	1,453
65	CLA 021	CLA	718268	8878142	170,00	155,00	162,50	9,00	11,977
66	EDOR-13-23	EDOR	738571	8937790	187,50	162,50	175,00	17,50	24,278

Continuación

N°	CÓDIGO	SECTOR	COORDENADAS		dap1 (cm)	dap2 (cm)	dap prom (cm)	HF (m)	Volumen (m ³)
			X	Y					
67	EDOR-13-22	EDOR	738673	8937538	125,00	105,00	115,00	12,50	8,559
68	EDOR-12-17	EDOR	738575	8937522	143,75	118,75	131,25	15,00	14,580
69	EDOR-12-16	EDOR	738490	8937476	80,00	106,00	93,00	16,50	7,944
70	EDOR-12-13	EDOR	738479	8937324	95,00	95,00	95,00	12,00	4,052
71	EDOR-13-19	EDOR	738554	8937324	105,00	95,00	100,00	14,00	7,994
72	EDOR-13-17	EDOR	738541	8937168	180,00	150,00	165,00	12,50	17,345
73	EDOR-12-09	EDOR	738483	8937128	180,00	150,00	165,00	8,00	6,030
74	EDOR-13-11	EDOR	738584	8936944	150,00	155,00	152,50	13,00	14,164
75	EDOR-12-03	EDOR	738407	8936767	90,00	115,00	102,50	15,50	7,777
76	EDOR-11-01	EDOR	738172	8936573	96,30	105,00	100,65	12,00	6,375
77	EDOR-10-08	EDOR	738178	8937157	130,00	130,00	130,00	11,00	9,048
78	EDOR-12-20	EDOR	738389	8937901	130,00	120,00	125,00	14,00	10,245
79	EDOR-10-24	EDOR	738015	8937954	145,00	125,00	135,00	17,00	13,741
80	EDOR-10-10	EDOR	738039	8937391	115,00	110,00	112,50	12,50	7,549
81	EDOR-10-14	EDOR	737960	8937525	77,50	72,50	75,00	11,50	3,405
82	EDOR-08-17	EDOR	737573	8937273	88,80	85,00	86,90	8,00	3,277
83	EDOR-07-20	EDOR	737508	8937278	162,50	143,75	153,13	16,00	16,015
84	EDOR-07-19	EDOR	737501	8937274	130,00	125,00	127,50	14,00	11,199
85	EDOR-07-21	EDOR	737477	8937285	112,50	77,50	95,00	12,50	5,360
86	EDOR-07-17	EDOR	737452	8937221	240,00	190,00	215,00	12,00	28,629
87	EDOR-08-28	EDOR	737658	8938040	150,00	125,00	137,50	12,00	12,208
88	EDOR-15-29	EDOR	739015	8937700	95,00	85,00	90,00	9,00	3,523
89	EDOR-15-31	EDOR	739087	8937791	112,50	92,50	102,50	11,00	6,378
90	EDOR-16-19	EDOR	739145	8937700	155,00	145,00	150,00	10,00	9,944
91	EDOR-17-18	EDOR	739475	8937862	130,00	120,00	125,00	12,00	11,850
92	EDOR-18-29	EDOR	739533	8938018	110,00	90,00	100,00	11,00	5,764
93	EDOR-18-31	EDOR	739574	8938316	155,00	160,00	157,50	12,00	14,678
94	EDOR-19-25	EDOR	739782	8938314	57,50	75,00	66,25	9,00	1,652
95	EDOR-18-35	EDOR	739599	8938539	92,50	75,00	83,75	10,00	3,738
96	EDOR-18-38	EDOR	739663	8938500	190,00	155,00	172,50	12,00	17,848
97	EDOR-18-34A	EDOR	739593	8938519	77,50	70,00	73,75	10,00	3,175
98	EDOR-18-34B	EDOR	739458	8938567	190,00	175,00	182,50	14,00	22,196
99	EDOR-13-32	EDOR	738675	8938159	190,00	135,00	162,50	11,50	12,660
100	EDOR-13-40	EDOR	738641	8938634	255,00	235,00	245,00	14,00	40,568
101	EDOR-13-48	EDOR	738620	8938894	85,00	85,00	85,00	8,50	3,399
102	POAVic	EDOR	738883	8939536	150,00	135,00	142,50	16,00	11,489
103	VIC	EDOR	739481	8939674	140,00	140,00	140,00	19,00	18,045

ANEXO 2

REGRESIÓN DEL MODELO 1

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,93912201
Coefficiente de determinación R ²	0,88195016
R ² ajustado	0,88074557
Error típico	2,33396175
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	3988,34005	3988,34005	732,15783	2,9048E-47
Residuos	98	533,842989	5,44737744		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-9,5126003	0,72720983	-13,0809568	3,1952E-23	-10,955724	-8,0694761
Variable X 1	16,6265179	0,61446754	27,0584151	2,9048E-47	15,407127	17,8459087

ANEXO 3
REGRESIÓN DEL MODELO 2

Estadísticas de la regresión	
R	0,94438903
R ²	0,89187064
R ² ajustado	0,89076728
Error típico	2,23374113
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	4033,20229	4033,20229	808,321862	3,9154E-49
Residuos	98	488,980743	4,98959942		
Total	99	4522,18304			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-4,45143857	0,52713885	-8,44452754	2,8303E-13	-5,49752847	-3,4053486
Variable X 1	0,96241252	0,03385081	28,4310018	3,9154E-49	0,89523669	1,02958836

ANEXO 4

REGRESIÓN DEL MODELO 3

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,95217493
R ²	0,90663709
R ² ajustado	0,90568441
Error típico	2,07562174
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	4099,97889	4099,97889	951,667417	2,9147E-52
Residuos	98	422,204148	4,30820559		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-0,5714131	0,37662751	-1,51718381	0,13243957	-1,3188181	0,17599187
Variable X 1	6,92189875	0,22437922	30,8491072	2,9147E-52	6,47662548	7,36717202

ANEXO 5

REGRESIÓN DEL MODELO 4

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,9857626
R ²	0,9717279
R ² ajustado	0,9714394
Error típico	1,1421942
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	4394,33149	4394,33149	3368,3165	1,0662E-77
Residuos	98	127,851549	1,30460764		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0,32053084	0,18987534	1,68811202	0,09456974	-0,05627059	0,69733228
Variable X 1	0,48866911	0,00841993	58,0371995	1,0662E-77	0,47196004	0,50537819

ANEXO 6

REGRESIÓN DEL MODELO 5

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,5391662
R ²	0,2907002
R ² ajustado	0,2834624
Error típico	5,7210527
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	1314,5995	1314,5995	40,1644257	7,1471E-09
Residuos	98	3207,58354	32,7304443		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-6,1055158	2,47015999	-2,47170865	0,01517127	-11,0074679	-1,2035637
Variable X 1	1,24756947	0,19685387	6,33754098	7,1471E-09	0,85691937	1,63821957

ANEXO 7

REGRESIÓN DEL MODELO 6

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,95232655
R ²	0,90692586
R ² ajustado	0,90500681
Error típico	2,08306447
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4101,2847	2050,64237	472,58997	9,732E-51
Residuos	97	420,89828	4,33915758		
Total	99	4522,1830			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-1,482122	1,702585	-0,87051315	0,386169	-4,86128	1,89703
Variable X 1	1,6393598	2,9883286	0,54858755	0,584549	-4,29164	7,57036
Variable X 2	6,2601940	1,2270367	5,10187981	1,6699E-06	3,824865	8,69552

ANEXO 8

REGRESIÓN DEL MODELO 7

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,97911596
R ²	0,95866807
R ² ajustado	0,95781586
Error típico	1,3881329
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4335,27248	2167,63624	1124,92692	7,7599E-68
Residuos	97	186,910555	1,92691293		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-6,58262519	0,59947067	-10,9807294	1,0385E-18	-7,77240852	-5,39284185
Variable X 1	6,32029776	0,15963081	39,5932188	1,1087E-61	6,00347478	6,63712074
Variable X 2	0,5614671	0,05081013	11,0502984	7,3684E-19	0,46062305	0,66231114

ANEXO 9

REGRESIÓN DEL MODELO 8

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,95902273
R ²	0,91972459
R ² ajustado	0,91806943
Error típico	1,93454778
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4159,16295	2079,58147	555,670089	7,4516E-54
Residuos	97	363,020085	3,74247511		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-13,8565007	0,88131907	-15,7224563	1,9998E-28	-15,6056751	-12,1073263
Variable X 1	15,2001229	0,55133904	27,5694659	1,0964E-47	14,1058675	16,2943783
Variable X 2	0,48682753	0,07205789	6,75606143	1,0546E-09	0,34381257	0,6298425

ANEXO 10

REGRESIÓN DEL MODELO 9

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,97758161
R ²	0,95566581
R ² ajustado	0,95475171
Error típico	1,43766459
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4321,69573	2160,84786	1045,4639	2,3272E-66
Residuos	97	200,487309	2,06687947		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	2,20780835	0,65788705	3,35590791	0,0011305	0,90208467	3,51353203
Variable X 1	1,25278942	0,03284445	38,1431089	3,3323E-60	1,18760228	1,31797657
Variable X 2	-0,88105725	0,07457508	-11,8143652	1,7361E-20	-1,02906814	-0,73304635

ANEXO 11

REGRESIÓN DEL MODELO 10

Estadísticas de la regresión	
R	0,98626963
R ²	0,97272778
R ² ajustado	0,97216547
Error típico	1,12758279
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	4398,85307	2199,42653	1729,86647	1,3566E-76
Residuos	97	123,329966	1,27144295		
Total	99	4522,18304			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	1,21299504	0,50902376	2,38298313	0,01912154	0,20272377	2,22326631
Variable X 1	-0,08929413	0,04735067	-1,88580507	0,06231333	-0,18327209	0,00468384
Variable X 2	0,49963535	0,0101444	49,2523094	1,9185E-70	0,47950152	0,51976919

ANEXO 12

REGRESIÓN DEL MODELO 11

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98717163
R ²	0,97450783
R ² ajustado	0,97398222
Error típico	1,09016345
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4406,90277	2203,45138	1854,04485	5,1373E-78
Residuos	97	115,280267	1,18845636		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-1,37166992	0,55095805	-2,48960864	0,01448997	-2,46516914	-0,27817071
Variable X 1	2,60337585	0,80045828	3,25235671	0,00157506	1,01468775	4,19206395
Variable X 2	0,42062068	0,0224131	18,7667321	4,7274E-34	0,37613688	0,46510448

ANEXO 13

REGRESIÓN DEL MODELO 12

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98749691
R ²	0,97515015
R ² ajustado	0,97463778
Error típico	1,07634151
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4409,80746	2204,90373	1903,22202	1,4901E-78
Residuos	97	112,375571	1,15851104		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0,00658825	0,19847759	0,03319393	0,97358814	-0,38733482	0,40051132
Variable X 1	1,32185919	0,3616648	3,6549291	0,00041763	0,60405468	2,0396637
Variable X 2	0,40332109	0,02466268	16,3534974	1,2382E-29	0,3543725	0,45226969

ANEXO 14

REGRESIÓN DEL MODELO 13

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98608845
R ²	0,97237042
R ² ajustado	0,97180074
Error típico	1,13494629
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4397,23704	2198,61852	1706,86534	2,5506E-76
Residuos	97	124,945999	1,28810309		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0,87551291	0,41490112	2,11017246	0,03741661	0,05204904	1,69897679
Variable X 1	-0,09821353	0,06539319	-1,50189245	0,13637336	-0,22800091	0,03157384
Variable X 2	0,53476235	0,03181008	16,8110991	1,6998E-30	0,47162816	0,59789655

ANEXO 15

REGRESIÓN DEL MODELO 14

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98325927
R ²	0,9667988
R ² ajustado	0,96611423
Error típico	1,24412815
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4372,04111	2186,02056	1412,29039	1,8878E-72
Residuos	97	150,141922	1,54785486		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-3,26153986	0,30441627	-10,7140787	3,8785E-18	-3,86572189	-2,65735783
Variable X 1	3,87314498	0,26177749	14,7955619	1,3027E-26	3,35358914	4,39270083
Variable X 2	0,49469152	0,03680766	13,4399052	7,0579E-24	0,4216385	0,56774455

ANEXO 16

REGRESIÓN DEL MODELO 15

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98770786
R ²	0,97556682
R ² ajustado	0,97480328
Error típico	1,07282389
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	4411,69173	1470,56391	1277,69452	3,2676E-77
Residuos	96	110,491305	1,1509511		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-1,01845729	0,82518981	-1,23420973	0,22013756	-2,65644613	0,61953154
Variable X 1	1,87003931	0,5599114	3,33988433	0,00119463	0,75862397	2,98145466
Variable X 2	0,08953307	0,06997466	1,27950696	0,20380236	-0,04936554	0,22843167
Variable X 3	0,35693135	0,0438038	8,14841139	1,3773E-12	0,2699815	0,44388120

ANEXO 17

REGRESIÓN DEL MODELO 16

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,9868351
R ²	0,97384351
R ² ajustado	0,97302612
Error típico	1,11001331
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	4403,8986	1467,9662	1191,40572	8,6025E-76
Residuos	96	118,284438	1,23212956		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0,96790333	0,92063619	1,05134182	0,2957409	-0,85954507	2,79535173
Variable X 1	-8,28234292	1,71364188	-4,83318189	5,0943E-06	-11,6838952	-4,88079067
Variable X 2	6,86433713	0,65499283	10,4800187	1,3893E-17	5,56418664	8,16448762
Variable X 3	0,55474192	0,03539768	15,6717037	3,3084E-28	0,48447808	0,62500575

ANEXO 18

REGRESIÓN DEL MODELO 17

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98750853
R ²	0,97517309
R ² ajustado	0,97439725
Error típico	1,08143339
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	4409,91121	1469,9704	1256,92407	7,037E-77
Residuos	96	112,271825	1,16949817		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-0,25088083	0,88714928	-0,28279438	0,77794333	-2,01185823	1,51009658
Variable X 1	0,46257861	1,55309613	0,29784287	0,76646672	-2,62029284	3,54545005
Variable X 2	1,13993067	0,71073451	1,60387691	0,11202627	-0,27086618	2,55072753
Variable X 3	0,40297648	0,02480635	16,2448911	2,6788E-29	0,35373626	0,4522167

ANEXO 19

REGRESIÓN DEL MODELO 18

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98726865
R ²	0,97469939
R ² ajustado	0,97390874
Error típico	1,09170169
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	4407,76903	1469,25634	1232,79143	1,743E-76
Residuos	96	114,414008	1,19181258		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-0,95809602	0,73466746	-1,30412203	0,19531022	-2,4163994	0,50020737
Variable X 1	2,4455787	0,82267894	2,97270123	0,00373165	0,81257391	4,0785835
Variable X 2	-0,0550377	0,06455658	-0,85254985	0,39603097	-0,18318149	0,07310609

ANEXO 20

REGRESIÓN DEL MODELO 19

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98028772
R ²	0,96096401
R ² ajustado	0,95974414
Error típico	1,35603546
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	4345,65515	1448,55172	787,756354	1,8981E-67
Residuos	96	176,527887	1,83883216		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-4,27373814	1,13449672	-3,76707843	0,0002849	-6,52569634	-2,02177994
Variable X 1	-4,80988455	2,02418976	-2,37620239	0,01947712	-8,82786947	-0,79189962
Variable X 2	8,2253978	0,81676595	10,0706914	1,0485E-16	6,60413022	9,84666539
Variable X 3	0,59538528	0,05164697	11,527981	8,1494E-20	0,49286686	0,69790371

ANEXO 21

REGRESIÓN DEL MODELO 20

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98375288
R^2	0,96776972
R^2 ajustado	0,96676253
Error típico	1,23216951
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	4376,43183	1458,81061	960,855309	1,9326E-71
Residuos	96	145,751204	1,51824171		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-2,43833473	0,9574377	-2,54672939	0,01246354	-4,33883354	-0,53783592
Variable X 1	0,59170421	0,11364252	5,20671487	1,0932E-06	0,36612559	0,81728284
Variable X 2	3,43469846	0,57203438	6,00435667	3,4173E-08	2,29921919	4,57017774
Variable X 3	-0,13065595	0,14037177	-0,93078504	0,35429956	-0,40929171	0,14797982

ANEXO 22

REGRESIÓN DEL MODELO 21

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98718449
R ²	0,97453321
R ² ajustado	0,97373738
Error típico	1,09528094
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	4407,01756	1469,00585	1224,53855	2,3863E-76
Residuos	96	115,165473	1,19964034		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-1,10750568	1,01767912	-1,0882661	0,27920222	-3,12758277	0,9125714
Variable X 1	2,45272737	0,94017824	2,60878977	0,0105392	0,58648832	4,31896643
Variable X 2	-0,01663312	0,05377009	-0,30933781	0,75773497	-0,12336591	0,09009966
Variable X 3	0,42660113	0,02967898	14,3738455	1,141E-25	0,36768881	0,48551345

ANEXO 23

REGRESIÓN DEL MODELO 22

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98773088
R ²	0,97561229
R ² ajustado	0,97458544
Error típico	1,07745156
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	4411,89736	1102,97434	950,101269	1,1638E-75
Residuos	95	110,285678	1,16090187		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0,17850613	0,94287582	0,18932093	0,85024519	-1,69333905	2,0503513
Variable X 1	-2,51845172	2,75473342	-0,91422702	0,36291214	-7,98728902	2,95038557
Variable X 2	0,18813071	0,14383075	1,30800063	0,19402928	-0,09740943	0,47367085
Variable X 3	3,01447952	1,59853764	1,88577325	0,0623808	-0,15901894	6,18797798
Variable X 4	0,27157004	0,103459	2,62490494	0,01010092	0,06617796	0,47696213

ANEXO 24

REGRESIÓN DEL MODELO 23

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,9877171
R ²	0,97558507
R ² ajustado	0,97455707
Error típico	1,07805276
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	4411,77425	1102,94356	949,015396	1,2271E-75
Residuos	95	110,408787	1,16219775		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-0,86536773	1,00879688	-0,85782158	0,39315001	-2,86808276	1,13734729
Variable X 1	-0,45555905	1,70965345	-0,2664628	0,79046031	-3,84965026	2,93853217
Variable X 2	0,09830888	0,0776465	1,26610828	0,20857025	-0,05583892	0,25245668
Variable X 3	2,10293837	1,03947559	2,02307623	0,04587535	0,0393184	4,16655834
Variable X 4	0,35272373	0,04676395	7,54264126	2,7355E-11	0,25988554	0,44556191

ANEXO 25

REGRESIÓN DEL MODELO 24

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,98773093
R ²	0,97561238
R ² ajustado	0,97431517
Error típico	1,08316553
Observaciones	100

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	5	4411,89776	882,379553	752,082998	3,8266E-74
Residuos	94	110,285272	1,17324757		
Total	99	4522,18304			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0,12156024	3,2061639	0,03791454	0,96983622	-6,24435335	6,48747382
Variable X 1	-2,41376207	6,27492053	-0,38466815	0,70135222	-14,8727639	10,0452398
Variable X 2	0,17827519	0,54944794	0,32446239	0,74630892	-0,91266658	1,26921696
Variable X 3	2,9702703	2,86991919	1,03496653	0,30333981	-2,72802153	8,66856212
Variable X 4	0,00551178	0,29645204	0,01859248	0,98520561	-0,5831007	0,59412426
Variable X 5	0,2756365	0,24218595	1,13811928	0,25796317	-0,20522938	0,75650239

ANEXO 26

REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 3 ($1/K = 1/DAP^{1,5}$)

Estadísticas de la regresión

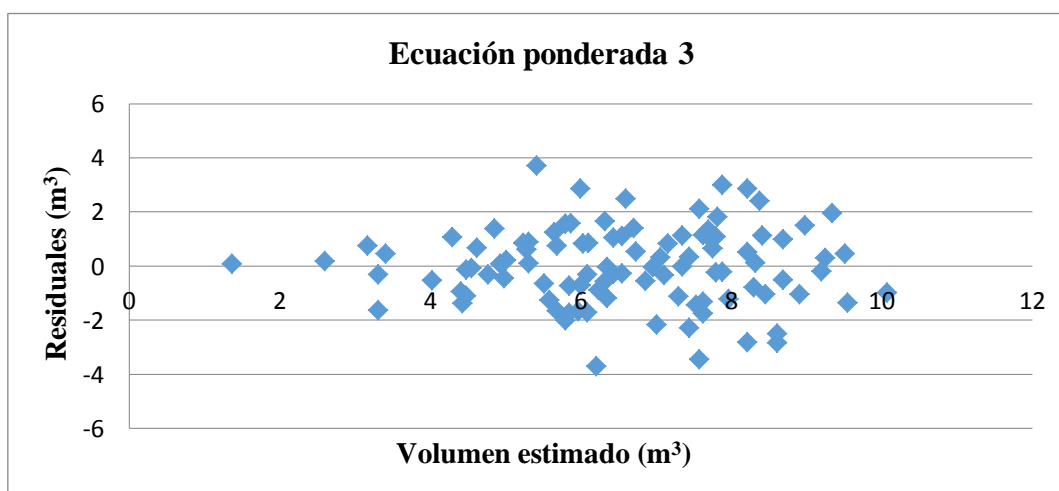
R	0,97895503
R ²	0,95835295
R ² ajustado	0,9477239
Error típico	1,42968233
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	2	4609,42131	2304,71065	1127,5539	6,9623E-68
Residuos	98	200,311172	2,04399155		
Total	100	4809,73248			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	-0,69331897	0,17551505	-3,9501966	0,00014726	-1,04162289	-0,34501506
Variable X 2	7,0164776	0,20819263	33,701854	1,0511E-55	6,6033261	7,4296291

Gráfico de residuos:



FUENTE: *Elaboración propia*

ANEXO 27

REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 4 ($1/K = 1/(DAP^2H)^{1,2}$)

Estadísticas de la regresión

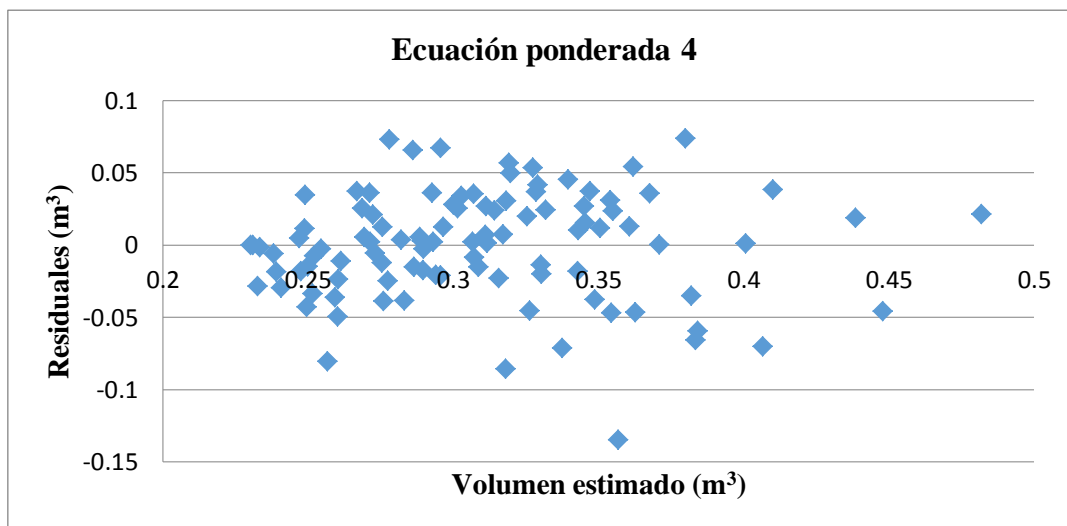
R	0,99313695
R ²	0,98632101
R ² ajustado	0,97597734
Error típico	0,03725583
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	9,8079599	4,90397995	3533,13463	2,4296E-91
Residuos	98	0,1360237	0,001388		
Total	100	9,9439836			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	-0,04686604	0,02411158	-1,94371512	0,05479812	-0,09471469	0,0009826
Variable X 2	0,51644823	0,00739206	69,8652732	2,084E-85	0,50177893	0,53111753

Gráfico de residuos



FUENTE: Elaboración propia

ANEXO 28

REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 11 ($1/K = 1/DAP^{1,5}H$)

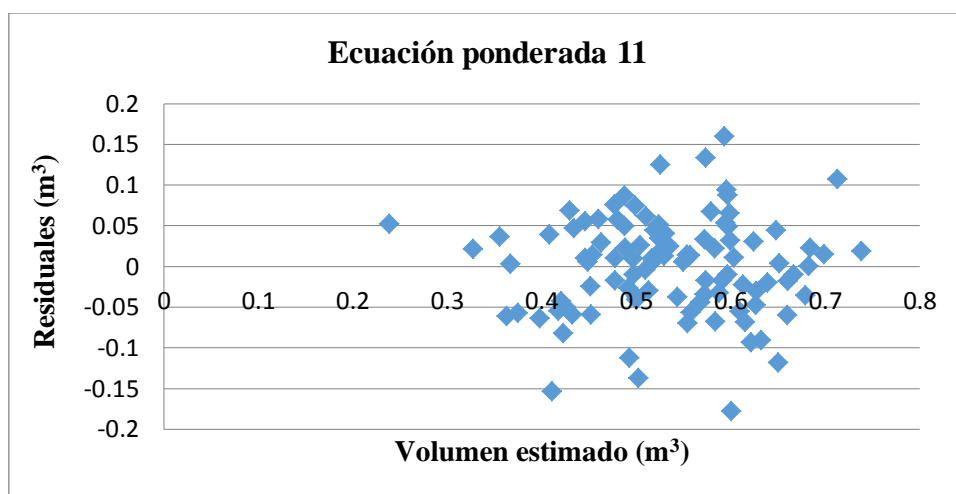
<i>Estadísticas de la regresión</i>	
R	0,99393013
R ²	0,9878971
R ² ajustado	0,97733828
Error típico	0,06078885
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	3	29,2578182	9,75260607	2639,20326	4,5619E-92
Residuos	97	0,35844257	0,00369528		
Total	100	29,6162608			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	-0,36699276	0,17342575	-2,11613769	0,03689339	-0,71119485	-0,02279066
Variable X 2	0,79027155	0,38724993	2,04072742	0,04399492	0,02168764	1,55885546
Variable X 3	0,4796249	0,01795289	26,715746	1,6309E-46	0,44399338	0,51525642

Gráfico de residuos:



FUENTE: Elaboración propia

ANEXO 29

REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 12 ($1/K = 1/DAP^{1.5}H$)

Estadísticas de la regresión

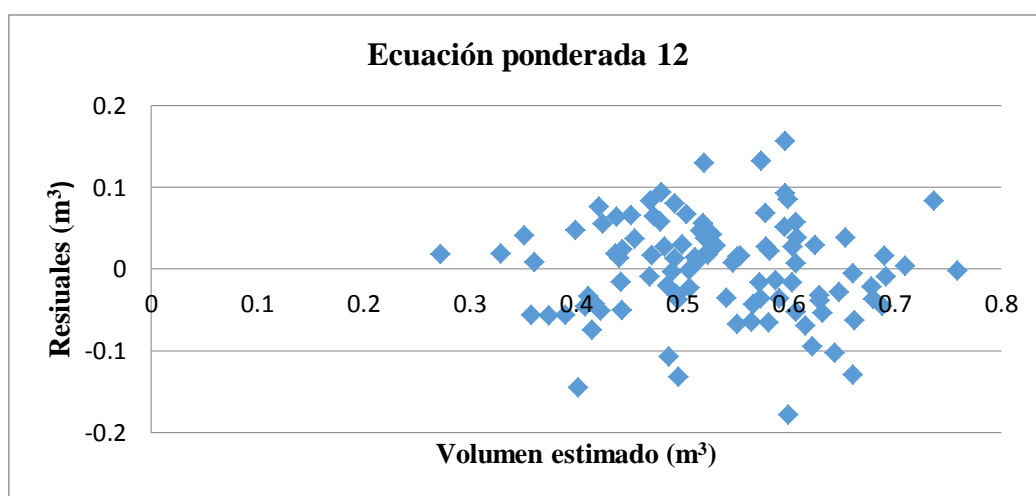
R	0,9939559
R ²	0,98794833
R ² ajustado	0,97739056
Error típico	0,06066007
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	3	29,2593354	9,75311179	2650,55886	3,7216E-92
Residuos	97	0,35692542	0,00367964		
Total	100	29,6162608			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	-0,11078733	0,06410713	-1,72815935	0,08714181	-0,23802224	0,01644757
Variable X 2	0,65153632	0,3039596	2,14349647	0,03457402	0,04826066	1,25481199
Variable X 3	0,46508526	0,02356407	19,7370531	9,7123E-36	0,41831711	0,51185341

Gráfico de residuos:



FUENTE: Elaboración propia

ANEXO 30

REGRESIÓN PONDERADA DEL MODELO 16 (1/K = 1/DAPH)

Estadísticas de la regresión

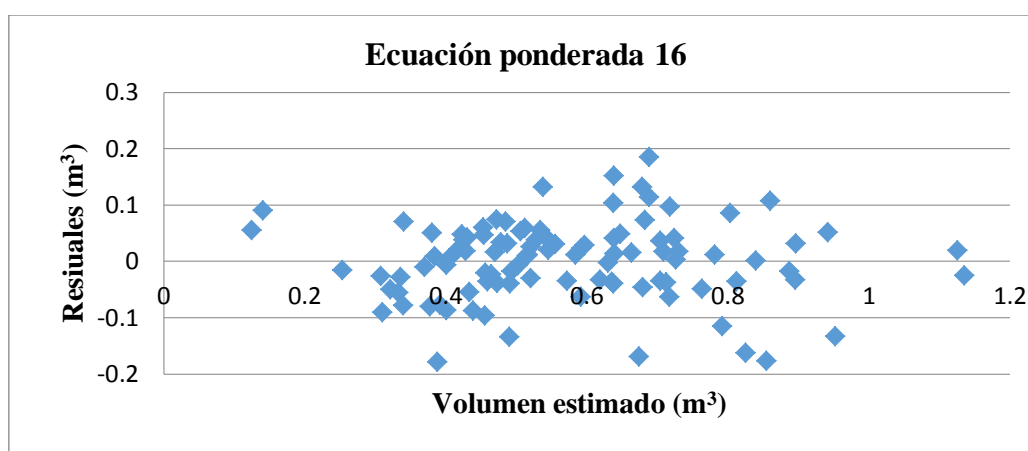
R	0,99344789
R ²	0,9869387
R ² ajustado	0,97611387
Error típico	0,07081673
Observaciones	100

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4	36,3786693	9,09466734	1813,48947	9,4701E-89
Residuos	96	0,48144093	0,00501501		
Total	100	36,8601103			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Variable X 1	1,48404173	0,34393317	4,31491313	3,8785E-05	0,80133979	2,16674367
Variable X 2	-8,51791494	0,90285042	-9,43446967	2,4414E-15	-10,3100589	-6,72577101
Variable X 3	7,17640149	0,43386552	16,5406126	7,4436E-30	6,31518524	8,03761775
Variable X 4	0,50194797	0,02872529	17,4740758	1,4057E-31	0,44492871	0,55896723

Gráfico de residuos:



FUENTE: *Elaboración propia*