

## **ANEXO. ENTREGABLE FV5.2 INFORME CON MODELOS DE ESTIMACIÓN DESARROLLADOS PARA LA PRECLASIFICACIÓN DE TROAZS DE MADERA.**

### **1. EXPLORACIÓN DE DATOS**

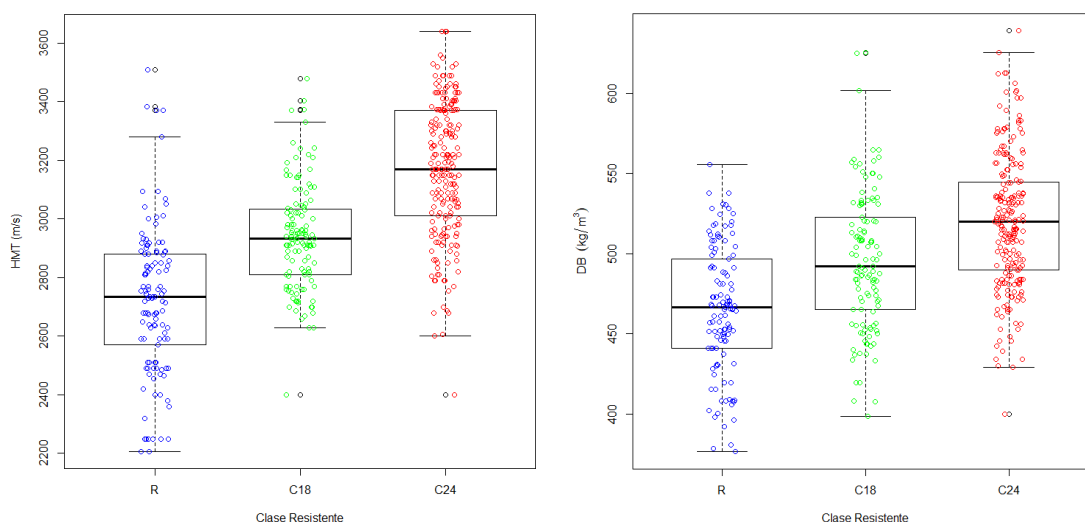
Se parte de la caracterización de 570 trozas posteriormente procesadas en el aserradero, para obtener tablas, algunas de las cuales han sido llevadas a rotura. Variables como diámetro en punta delgada, diámetro en punta gruesa, altura de la troza, longitud, velocidad con Hitman, densidad en verde y densidad básica, fueron obtenidas de cada una de las trozas. A continuación se muestra un resumen de estos datos indicando media, desviación estándar (SD), rango intercuartílico (IQR), mínimo, máximo, número de datos y datos ausentes (NA):

Variable	Media	SD	IQR	Mínimo	Máximo	n	NA
HMT	2968.3	279.9	381.7	21600	3920.0	560	10
DVT	1069.0	113.2	86.8	568.0	1241.0	561	9
DBT	492.3	52.0	71.2	366.8	668.2	551	19
RWT*	5.1	1.5	2.2	1.7	8.8	204	366
Dpd	26.6	5.8	8.0	12.8	46.5	568	2
Dpg	33.2	8.3	11.0	18.0	67.0	568	2
Dm	29.9	6.8	9.3	15.4	56.0	568	2
Con	6.7	4.6	6.3	0.0	22.8	568	2
Longitud	4.05	0.06	0.07	3.61	4.29	568	2
Rendimiento	37.8	11.0	14.9	12.0	72.4	528	42

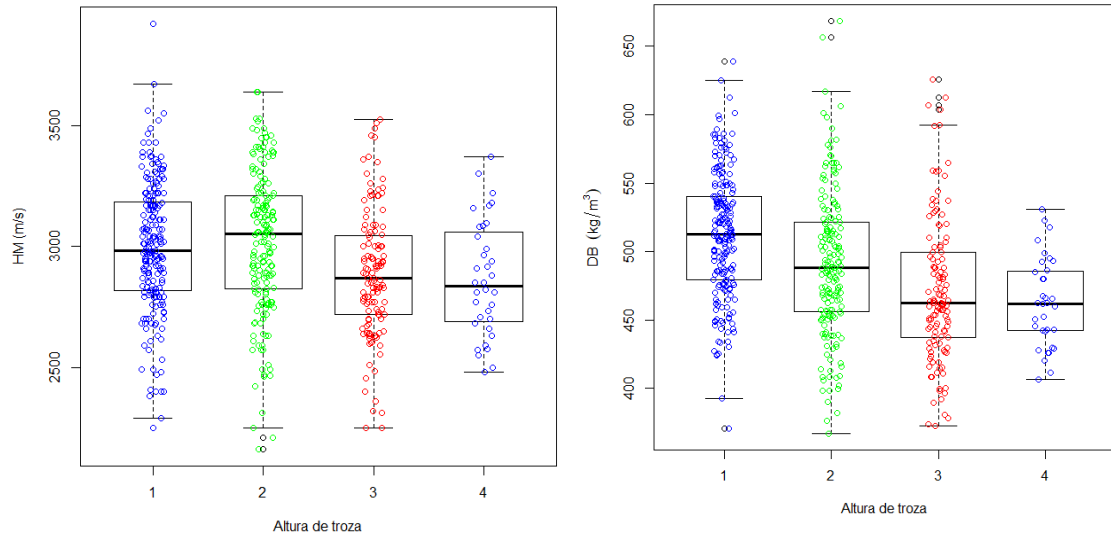
Dónde: HMT, velocidad con Hitman en la troza (m/s); DVT, densidad en verde de las trozas; DB12, densidad básica de la troza; RWT, anchura de los anillos de la troza (mm); Dpd, diámetro en punta delgada (cm); dpg, diámetro en punta gruesa (cm); Dm, diámetro medio (cm); Con, conicidad en cm/m; Longitud, longitud de la troza (m); Rendimiento, rendimiento en tablas de la troza (%).

\* La anchura de los anillos se calculó en función del conteo de anillos de las primeras trozas y su diámetro basa

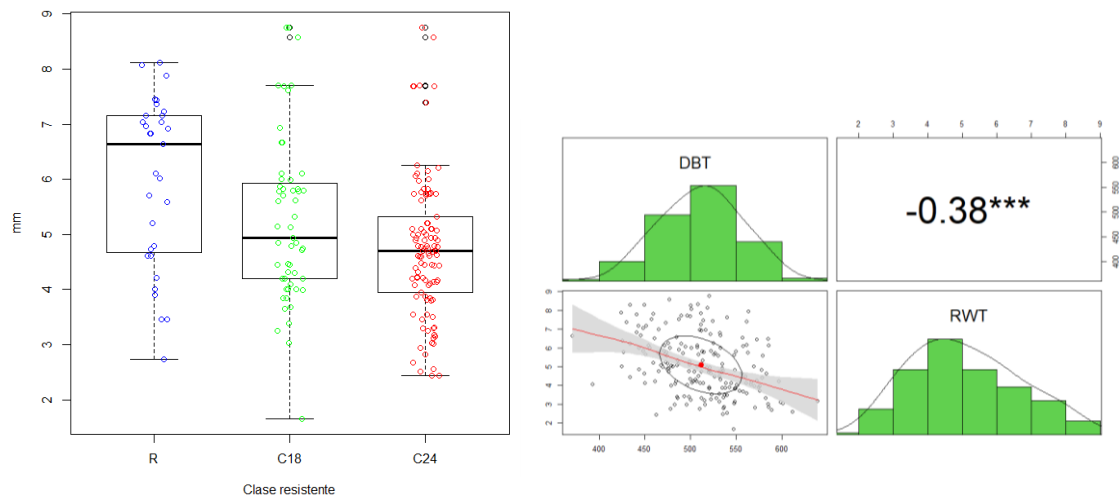
En el gráfico de cajas siguiente se aprecia diferencias significativas entre las clase resistentes asignadas a las tablas respecto den la velocidad con Hitman en las trozas de las que proceden. Con la densidad básica también se observa esta tendencia, aunque menos marcada, resultando que mayores densidades se relacionan con mejores clases resistentes.



Por otro lado, se aprecia cómo las mayores velocidades se encuentran en las segundas trozas, ligeramente superiores a las trozas basales, para a continuación ir descendiendo conforme se sube en altura. En el caso de la densidad básica, para estos datos, los mayores valores se hallaron en la troza basal y decrecieron con la altura.

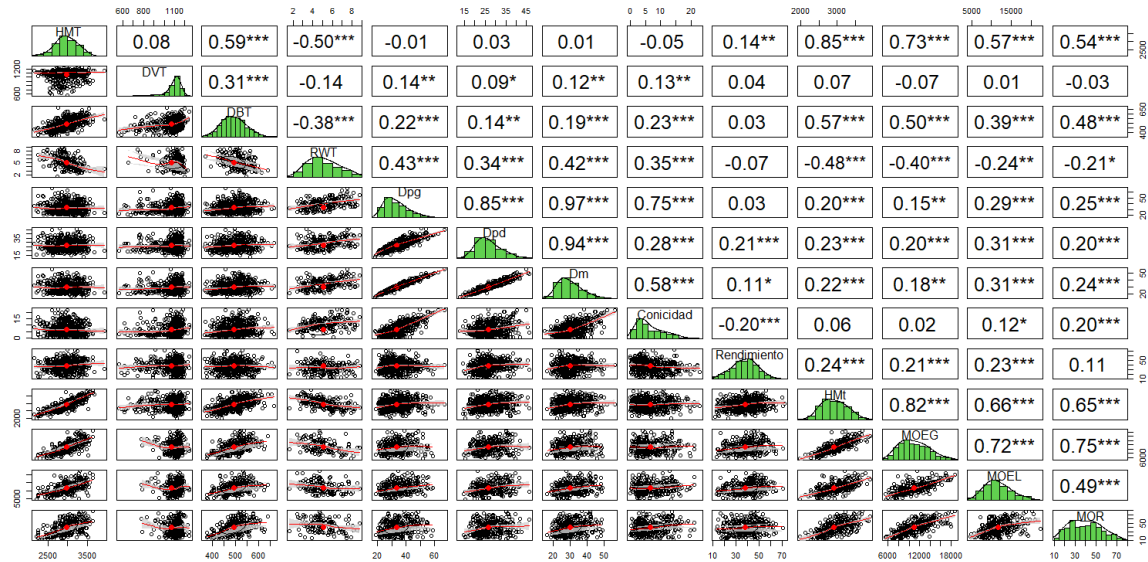


Por último, se analizó la anchura de anillos en función de la clase resistente. Se apreció un patrón opuesto al de la densidad básica, decreciendo la anchura de anillos conforme la clase resistente aumentaba. Para este análisis se consideraron solamente las trozas basales, puesto que en las restantes alturas se estimaron dando el valor de la troza basal, para así obtener una conclusión fidedigna entre clase resistente y anchura de anillos. A su vez, el gráfico de dispersión muestra una ligera correlación negativa ( $r=-0.38$ ) entre densidad básica y anchura de anillos.



Ya para finalizar este análisis exploratorio de los datos, se muestran las matrices de correlaciones entre las diversas variables más importantes tomadas en cada troza (Dpd, Dpg, Dm, Conicidad, densidad básica, densidad en verde, anchura de anillos, velocidad con Hitman y rendimiento en

tablas) con las variables de las tablas más destacadas (velocidad con Hitman en la tabla, MOEG, MOEL y MOR).



Así, se observa cómo el Hitman sobre la troza muestra correlaciones estadísticamente significativas con el MOEG, MOEL y MOR, así como con otras variables como la DB o RW. Destacan también las altas correlaciones de la DB con el MOEG, MOEL y MOR.

## 2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE CLASE RESISTENTE Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS TABLAS A PARTIR DE TROZAS

### A) MODELOS LOGÍSTICOS ORDINALES

Se filtraron los datos para asegurarnos que una serie de variables estaban disponibles en todas las trozas de modo que pudiésemos comparar diferentes modelos. Las variables consideradas fueron: velocidad con Hitman en la troza (HMT), la densidad en verde de la troza (DVT), la densidad básica de la troza (DB), diámetros de la troza y el porcentaje de madera juvenil (porc\_MJ) quedando una base de datos final compuesta de 435 datos. Se compararon diversos modelos jugando con estas variables, de los cuales se muestra un resumen en la siguiente tabla con los más destacados:

Modelo	n	Coefficientes	Umbrales	AIC
CRT ~ HMT	435	HMT: 0.0067366	R C18: 18.496 C18 C24: 20.313	665.59
CRT ~ HMT+Dpg	435	HMT: 0.0069529 Dpg: 0.0561561	R C18: 21.049 C18 C24: 22.947	649.15
CRT ~ HMT+porc_MJ	435	HMT: 0.0068744 Porc_MJ: -0.0068744	R C18: 18.110 C18 C24: 19.943	663.56
CRT ~ HMT+DB	435	HMT: 0.0061950 DB: 0.0063342	R C18: 20.024 C18 C24: 21.864	662.14
CRT ~ HMT+Dm	435	HMT: 0.0068713 Dm: 0.0609189	R C18: 20.772 C18 C24: 22.652	652.76
CRT ~ HMT+Con	435	HMT: 0.0069848 Con: 0.0901361	R C18: 19.825 C18 C24: 21.712	653.10
CRT ~ HMT+Dpg+DB	435	HMT: 0.0067410 Dpg: 0.0520960 DB: 0.0022538	R C18: 21.397 C18 C24: 23.299	650.58
CRT ~ HMT+Con+porc_MJ	435	HMT: 0.0069473 Con: 0.0866914 porc_MJ: -0.0057886	R C18: 19.444 C18 C24: 21.343	652.32

Dónde: CRT, clase resistente de la tabla llevada a rotura; n, tamaño de la muestra; HMT, velocidad con Hitman (m/s) sobre la troza; DVT, densidad en verde (kg/m<sup>3</sup>) de la troza en el momento de medición con Hitman; porc\_MJ, porcentaje de madera juvenil de la tabla; DB, densidad básica de la troza; Dpg, diámetro en punta gruesa (cm); Dm, diámetro medio de la troza (cm); Con, conicidad (cm/m).

A parte de estos se probaron muchas otras combinaciones pero ninguna resultó en mejores resultados, dejando estas porque nos permiten comparar diversas cuestiones como: a) si es mejor usar un solo diámetro, la media de los dos diámetros en la troza o un cálculo más complejo como es obtener la conicidad; b) analizar la mejora experimentada al considerar el porcentaje de madera juvenil de la futura tabla extraída de la troza en cuestión; c) comparar con algún modelo más complejo que use más de dos parámetros.

De todos ellos no se han obtenido mejoras substanciales. Si acaso un porcentaje de acierto ligeramente superior y un menor AIC si consideramos el diámetro en punta gruesa. La consideración del porcentaje de madera juvenil no aportó apenas mejoras, si acaso considerada conjuntamente con la conicidad se alcanzaron porcentajes de acierto algo superiores sin ser un incremento especialmente destacado.

Las matrices de confusión de cada uno fueron:

Modelo	n	Matriz de confusión				% aciertos
		Predichos		Observados		
CRt ~ HMT	435	R	R	C18	C24	65.3
		R	<b>68</b>	26	10	
		C18	31	<b>43</b>	28	
		C24	13	43	<b>173</b>	
CRt ~ HMT+Dpg	435	R	R	C18	C24	66.4
		R	<b>71</b>	23	11	
		C18	34	<b>41</b>	23	
		C24	7	48	<b>177</b>	
CRt ~ HMT+porc_MJ	435	R	R	C18	C24	66.4
		R	<b>68</b>	24	11	
		C18	28	<b>45</b>	24	
		C24	16	43	<b>176</b>	
CRt ~ HMT+DB	435	R	R	C18	C24	65.7
		R	<b>70</b>	25	10	
		C18	29	<b>39</b>	24	
		C24	13	48	<b>177</b>	
CRt ~ HMT+Dm	435	R	R	C18	C24	66.0
		R	<b>71</b>	24	12	
		C18	34	<b>41</b>	24	
		C24	7	47	<b>175</b>	
CRt ~ HMT+Con	435	R	R	C18	C24	67.4
		R	<b>72</b>	28	11	
		C18	26	<b>37</b>	16	
		C24	14	47	<b>184</b>	
CRt ~ HMT+Dpg+DB	435	R	R	C18	C24	66.7
		R	<b>75</b>	26	11	
		C18	30	<b>38</b>	23	
		C24	7	48	<b>177</b>	
CRt ~ HMT+porc_MJ+Con	435	R	R	C18	C24	68.3
		R	<b>73</b>	23	11	
		C18	28	<b>42</b>	18	
		C24	11	47	<b>182</b>	

Dónde: R, clase resistente de Rechazo; C18, Clase resistente C18; C24 Clase resistente C24.

Se observa que la adicción de nuevas variables mejora mínimamente el modelo que usa sólo la velocidad de Hitman aunque esta mejora parece no compensar demasiado el mayor esfuerzo en la toma de datos. Adicionalmente, se establecieron dos conjuntos de datos de (70% datos de entrenamiento y 30% datos de test) para recalcular los modelos y validarlos en muestras externas. Los resultados fueron los siguientes:

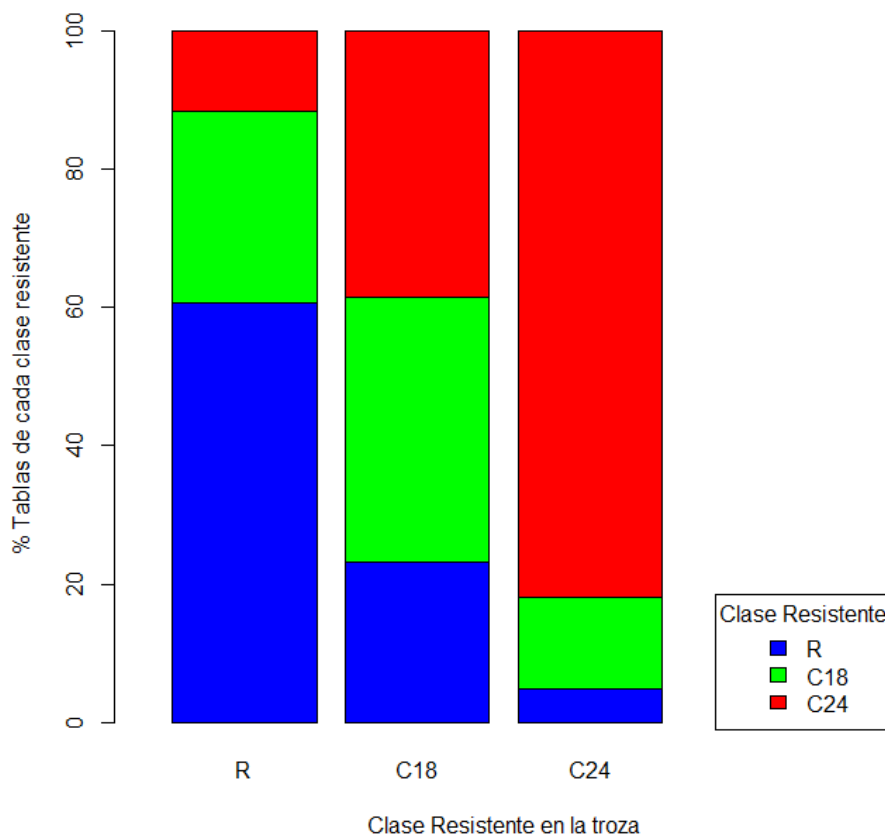
Modelo	n1	n2	AIC	% Aciertos entrenamiento	% Aciertos test
CRt ~ HMT	311	124	501.68	62.7	68.5
CRt ~ HMT+Dpg	311	124	488.58	65.3	72.6
CRt ~ HMT+porc_MJ	311	124	499.67	65.3	69.4
CRt ~ HMT+DB	311	124	495.89	64.0	71.0
CRt ~ HMT+Dm	311	124	491.29	63.7	72.6
CRt ~ HMT+Con	311	124	492.67	64.6	72.6
CRt ~ HMT+Dpg+DB	311	124	488.56	65.6	70.2

CRT ~ HMT+Con+porc_MJ	311	124	492.13	64.3	75.0
-----------------------	-----	-----	--------	------	------

Dónde:  $n_1$  y  $n_2$  son los tamaños de la muestra de entrenamiento y de test respectivamente.

En ambos casos, tanto con los datos en global como con el set de entrenamiento solamente, parece que los modelos parecen que simplemente con el equipo sónico se obtienen resultados suficientemente buenos y que difícilmente pueden ser mejorados con otras variables, lo cual en parte es positivo ya que simplificaría el proceso de clasificación desde tabla al basarlo sólo en este parámetro sin ser necesario calcular densidades.

En el gráfico de barras se observan el porcentaje de aciertos para cada clase resistente para el modelo que parte solamente de la velocidad sobre la troza. Se observa que para la clase de rechazo, el modelo clasifica correctamente en 60.7% de las tablas que identifica como de rechazo. Por el contrario, casi un 40% de las tablas estimadas como rechazo son, en realidad, aptas para usos estructurales, pero sólo un 11.6% serían de las clases más resistentes (C24). En donde peores resultados se obtienen es en la estimación de la clase resistente intermedia (C18) con un 38.4% de aciertos. Sin embargo, si el objetivo fuese discriminar lo apto para uso estructural de que no lo sería, sabemos que, cuando el modelo predice una clase resistente de C18, sólo el 23% de las tablas seleccionadas no serán aptas para usos estructurales. Ya por último, respecto a la clase resistente C24, el porcentaje de acierto es el más elevado (82%) mientras que podemos garantizar con casi total seguridad que, una tabla para la que el modelo prediga esta clase resistente será apta para un uso estructural, ya que sólo el 4.7% de las tablas acabarán siendo rechazadas.



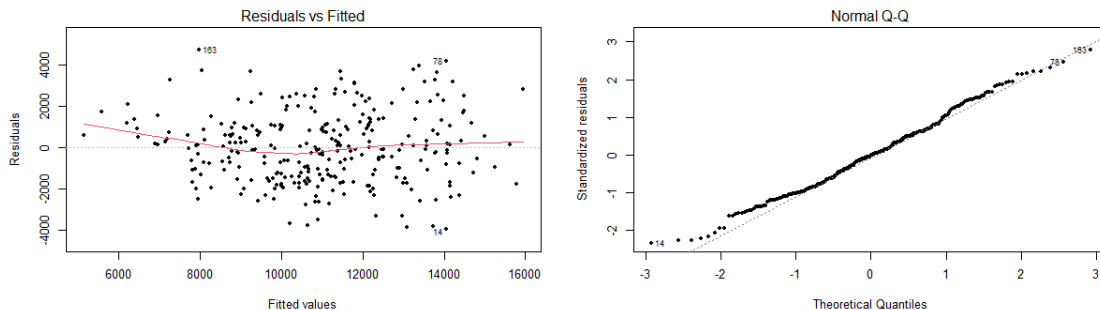
## B) MODELO LINEAL DE PREDICCIÓN DE MOE MEDIO DE LAS TABLAS DE UNA TROZA.

Se desarrolló un modelo de predicción del valor de módulo de elasticidad global corregido medio de las tablas de una troza a partir de los parámetros obtenidos mediante técnicas no destructivas sobre las trozas. En total, fueron 299 las trozas sobre las que se llevaron a rotura algunas de sus tablas. Asimismo, se filtraron los datos para que las variables de interés estuviesen presentes en todas las trozas, ya que algunos datos se perdieron en algunos casos a lo largo de todo el proceso de medición, quedando un total de 295 muestras disponibles para llevar a cabo la modelización. Finalmente, se eliminaron outliers con residuos superiores a 3, quedando un total de 291 muestras, alcanzando un modelo que predijo el 61% de la variabilidad existente con un error medio cuadrático (RMSE) de 1700 MPa a partir de la velocidad con Hitman sobre la troza y su diámetro medio. El modelo tomó la siguiente forma:

$$\text{MOEG} = -a + b \times \text{HMT} + c \times \text{Dm}$$

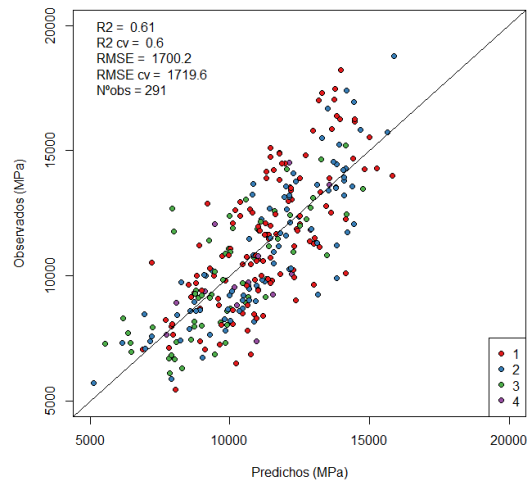
Siendo: *MOEG*, módulo de elasticidad global (MPa); *HMT*, velocidad con Hitman sobre la troza (m/s); *Dm*, diámetro medio de la troza (cm).

El análisis visual de los residuos no mostró problemas aparentes de heterocedasticidad ni de falta de normalidad. Tampoco se observó multicolinealidad entre variables (VIF bajos).



Se llevó a cabo una validación cruzada dejando uno fuera (LOO) para este modelo obteniendo valores de coeficiente de determinación y RMSE similares, como puede apreciarse el gráfico de valores observados frente a predichos siguiente (los puntos se han coloreado por valor de clase de calidad estética de la troza):





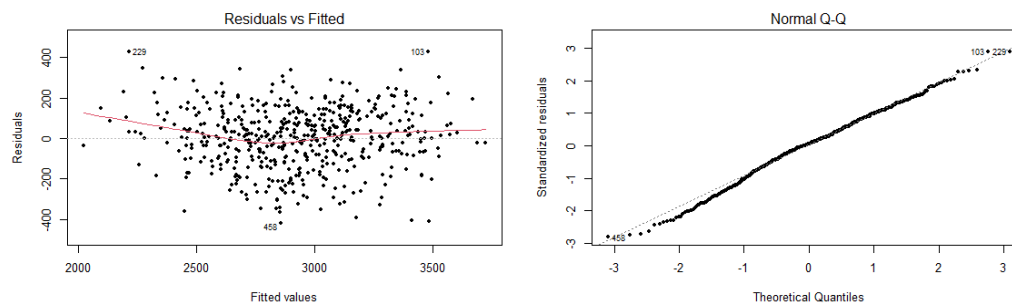
### C) MODELO LINEAL DE PREDICCIÓN DE VELOCIDAD MEDIA DE LAS TABLAS DE UNA TROZA.

A modo experimental, se desarrolló un modelo de predicción del valor de velocidad media de las tablas de una troza a partir de los parámetros obtenidos mediante técnicas no destructivas sobre las trozas. Se filtraron los datos para que las variables de interés estuviesen presentes en todas las trozas, ya que algunos datos se perdieron en algunos casos a lo largo de todo el proceso de medición, quedando un total de 523 trozas disponibles para llevar a cabo la modelización. Finalmente, se eliminaron outliers con residuos superiores a 3, quedando un total de 513 trozas, alcanzando un modelo que predijo el 81% de la variabilidad existente con un error medio cuadrático (RMSE) de 149.1 m/s a partir de la velocidad con Hitman sobre la troza y su diámetro medio. El modelo tomó la siguiente forma:

$$HMt = -a + b \times HMT + c \times Dpd + 0.365 \times DBT$$

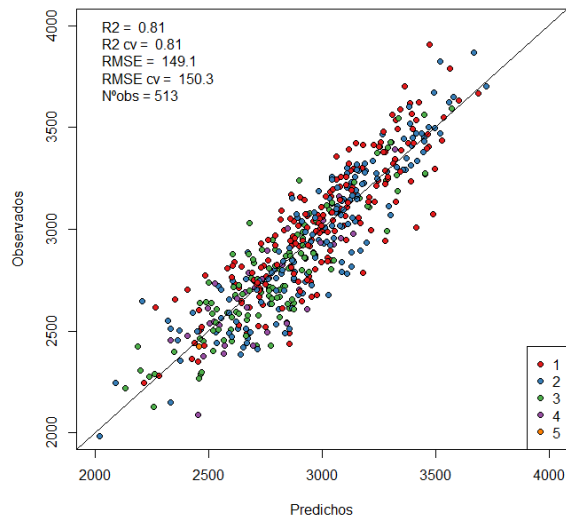
Siendo: *HMt*, velocidad media de las tablas de la troza (m/s); *HMT*, velocidad con Hitman sobre la troza (m/s); *Dpd*, diámetro en punta delgada (cm); *DBT*, densidad básica de la troza (kg/m<sup>3</sup>).

El análisis visual de los residuos no mostró problemas aparentes de heterocedasticidad ni de falta de normalidad. Tampoco se observó multicolinealidad entre variables (VIF bajos).



Se llevó a cabo una validación cruzada dejando uno fuera (LOO) para este modelo obteniendo valores de coeficiente de determinación y RMSE similares, como puede apreciarse el gráfico de valores observados frente a predichos siguiente (los puntos se han coloreado en función de la altura de la troza):





Se adjuntan diversas fotografías de los trabajos realizados en campo y en el aserradero sobre las trozas:













