



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-122

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Las imágenes panorámicas 360° de alta resolución en los inventarios forestales: Medición de distancias y diámetros normales

BECERRA ELCINTO, J.¹, CALVO SÁENZ, R.¹ y ECHAPRESTO RODRÍGUEZ, A.¹

¹ PANOimagen S.L. Gran Vía 23, Entreplanta, 26002 Logroño. La Rioja, España.

Resumen

Gracias a avances recientes de las técnicas de visión artificial y de los dispositivos de computación es posible desarrollar nuevas aplicaciones para el sector forestal, con el objetivo de facilitar las labores de inventario en campo. En el presente artículo se presentan los resultados obtenidos en la medición de distancias y en la medición del diámetro normal a partir de imágenes panorámicas 360° de alta resolución en plantaciones productivas de *Populus x euramericana*, mediante el análisis geométrico de dichas imágenes. Para poder estimar el diámetro normal de los árboles a partir del análisis geométrico de las imágenes es necesario conocer su distancia respecto a la posición de la cámara fotográfica, es por ello que se presentan los resultados de dos situaciones a la hora del cálculo del diámetro: a partir de distancias medidas en campo con cinta métrica; y partir de distancias estimadas a partir de las propias imágenes, mediante la información angular de las mismas.

Palabras clave

Dendrometría, parcela 360°, imagen panorámica 360°, distancias, resolución

1. Introducción

El conocimiento de las variables dendro y dasométricas de las masas forestales por parte del gestor es vital para definir objetivos y llevar a cabo su gestión. A la hora de realizar los inventarios forestales una de las variables básicas a medir es el diámetro normal o diámetro a la altura del pecho (DAP). Esta medida reviste especial importancia en el cálculo de volúmenes y del crecimiento (Thomas, 2012), entre otros. No obstante, pueden ser muchas las variables que se recogen en un inventario forestal (Prodan et al., 1997), pudiendo hacer muy costosas las tareas de inventario, lo que justifica el desarrollo de nuevas técnicas de inventario que faciliten la tarea.

El empleo de cámaras y de técnicas de visión artificial para el cálculo de variables dendro y dasométricas se ha analizado en más de una ocasión para estimar el área basimétrica y diámetros normales (Juujärvi et al., 1998), el diámetro a una determinada altura, volúmenes de árboles, alturas... (Varjo et al., 2006; Fastie, 2010; Shimizu et al., 2014; Siiphilehto et al., 2016). Se trata de métodos baratos y bastante precisos (Shimizu et al., 2014), aunque aún no se ha popularizado su aplicación en campo, a pesar de existir dispositivos de medición como es el caso del Modelo de Utilidad MU2005-01738 y ForeStereo, que permiten caracterizar la estructura de masas forestales mediante imágenes estereoscópicas hemisféricas (Rodríguez-García et al., 2014).

El empleo de imágenes en inventarios forestales, además de tener utilidad para la obtención de distintas variables daso y dendrométricas, constituyen un registro gráfico muy útil de la parcela inventariada, como por ejemplo, para detectar, si la resolución es suficiente, la presencia de plagas o enfermedades, lo que puede tener gran interés, dado que los agentes que provoquen pérdidas significativas de follaje durante el período vegetativo o perforaciones significativas de la madera, pueden tener repercusiones muy negativas en términos de producción (Sixto, et al. 2010).

El empleo de imágenes panorámicas 360° presenta una serie de ventajas respecto al empleo de imágenes convencionales, como es el caso de que se tiene en una sola imagen una visión general

de toda la parcela inventariada y además es más sencillo extraer la información angular de los píxeles dado que se conoce el ángulo de visión ($360^\circ \cdot 180^\circ$) sin necesidad de realizar calibraciones de la cámara. En el caso de que se trabaje con imágenes de proyección panorámica o cilíndrica equirectangular, como es el caso que se presenta, las medidas más aconsejables son respecto a la horizontal de la cámara, dado que mediante esta proyección se reduce mucho la distorsión lateral de la imagen para campos de visión mayores de 180° .

La principal aplicación de imágenes panorámicas 360° en el campo forestal ha sido la estimación del área basimétrica, siguiendo el método de conteo angular propuesto por Bitterlich y para lo cual ofrecen la promesa de mejorar la eficacia de dicho método (Fastie, 2010). También se han capturado imágenes panorámicas 360° con fines artísticos o paisajísticos, y en menor medida, para el seguimiento de invasiones biológicas, de la presión humana en áreas periurbanas y para la gestión de hábitats (Smith, 2010).

En el caso que se presenta se exponen dos situaciones en la estimación de diámetros normales, una situación en la que las distancias a los árboles se toman en campo y otra en la que esta distancia se obtiene directamente sobre las propias imágenes. En los trabajos similares al que se presenta, donde se estimaba el diámetro normal a partir de imágenes, la distancia al árbol desde el punto de captura de la imagen se medía con distanciómetros láser y/o telémetros (Juujärvi et al., 1998; Varjo et al., 2006), así como en el estudio de mediciones de diámetros a diferentes alturas de fuste presentado por Shimizu et al. (2014), que también obtiene en campo el valor de la distancia al punto de medición. Gracias al empleo de imágenes panorámicas de 360° es posible estimar esas distancias a partir de las imágenes mediante una formulación trigonométrica.

Se analizan, por tanto, los resultados obtenidos en la medición de distancias y diámetros normales en choperas a partir de imágenes panorámicas 360° de alta resolución, comparando la medida del diámetro, por un lado, a partir de distancias tomadas en campo y por otro lado a partir de distancias estimadas a partir de las propias imágenes.

2. Objetivos

El objetivo principal de este artículo es exponer y analizar resultados obtenidos en la medición de distancias y del diámetro normal de individuos de *Populus x euramericana* a partir de imágenes panorámicas 360° de alta resolución. Se comparará el resultado de realizar la estimación del diámetro tomando como referencia las distancias tomadas en campo y distancias estimadas a partir de las propias imágenes.

3. Metodología

Los datos presentados en este artículo provienen de un estudio experimental que está desarrollando PANOimagen S.L. en plantaciones de chopo (*Populus x euramericana*) en La Rioja, cuyo objetivo final es el estudio de variables de interés en el aprovechamiento comercial del chopo (diámetros, calidad del fuste, área basimétrica, volumen de madera, aspectos sanitarios, ...) a partir de imágenes panorámicas 360° de alta resolución. Concretamente, los datos presentados pertenecen a una serie de parcelas levantadas en el año 2016 en una chopera localizada en la Comunidad Autónoma de La Rioja, en el término municipal de Albelda de Iregua, a 515 metros de altitud en la margen derecha del río Iregua.

Se ha realizado en campo un inventario clásico con cinta diamétrica mediante el cual se ha medido el diámetro normal de un total de 50 pies, su rumbo y la distancia con respecto al centro de la parcela, con la ayuda de una cinta métrica y una brújula. También se tomó información de la pendiente de la parcela mediante un dispositivo móvil con giróscopo integrado.

Por otro lado, se estacionó en el centro de las parcelas, un trípode motorizado (*Celestron All-View-Mount*) programado y equipado con una cámara réflex digital (*Canon EOS 20D f10mm*) (Figura 1) y se capturaron las imágenes necesarias para reconstruir la imagen panorámica 360° de alta resolución en alto rango dinámico (HDR - *High Dinamic Range*), mediante la combinación de 3 imágenes con distinta exposición, para evitar problemas de iluminación y sombreado que impidan identificar correctamente los fustes de los pies analizados, dado que esto compromete las medidas finales (Vastaranta et al., 2015).

Las imágenes panorámicas 360° se ensamblaron a partir de 25 fotografías por cada parcela. Dicho número es función de las características del sensor de la cámara y de la distancia focal, que definen el campo de visión de la cámara (FOV - *Field Of View*). El montaje de las imágenes panorámicas 360° se realizó con el software Hugin-Panorama Photo Sticher empleándose una proyección equirectangular, también conocida como proyección panorámica.



Figura 1. Conjunto trípode - cámara empleado

La medición sobre las imágenes se hace posible dado que se conoce la resolución de la imagen ($imgW \cdot imgH$ ancho y alto respectivamente) y el ángulo de visión de las mismas ($360^\circ \cdot 180^\circ$ en horizontal y vertical respectivamente), por lo que es posible obtener la resolución angular en grados por pixel mediante las relaciones siguientes:

$$resW = \frac{360^\circ}{imgW} \text{ [ec. 1]}$$

$$resH = \frac{180^\circ}{imgH} \text{ [ec. 2]}$$

Siendo $imgW$ e $imgH$ la resolución o número de píxeles de la imagen en horizontal y vertical respectivamente y $resW$ y $resH$ la resolución angular de cada pixel en horizontal y vertical respectivamente.

El diámetro normal (*DAP*) se calcula a partir del número de píxeles que ocupa la sección normal de los árboles en las imágenes panorámicas 360° de alta resolución y de la distancia a la que se sitúa respecto al centro de la parcela donde se estacionó la cámara, de acuerdo con la ecuación ec.3.

$$DAP = 2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{npix}{2} \cdot resW\right) \cdot Dist \cdot 100 \text{ [ec. 3]}$$

Donde, *DAP* es el diámetro normal del árbol o diámetro a la altura del pecho que se desea calcular (en cm), *npix* es el número de píxeles que ocupa la sección del árbol a 1,3 metros, *resW* es la resolución angular de cada pixel en horizontal y *Dist* es la distancia horizontal (en m) desde el punto de captura de las imágenes hasta el individuo en cuestión.

El valor de la distancia horizontal *Dist* existente entre el punto de captura y los distintos pies se puede calcular a partir de la información angular de los píxeles existentes entre la horizontal del posicionamiento de la cámara y de la altura a la que se estaciona la cámara *hcámara* (en m) (ec.4), siendo *resH* la información angular de cada pixel, y *npix* el número de píxeles existentes entre la horizontal de la cámara y la base del árbol.

$$Dpie = \frac{hcámara}{\operatorname{tg}(npix \cdot resH)} \text{ [ec. 4]}$$

La cámara se posicionó a una altura de 1,30 metros, que es la altura a la que se mide el diámetro normal, facilitándose de esta forma el cálculo del diámetro y la obtención del número de píxeles para el cálculo de las distancias.

Para el cálculo de la distancia sobre las imágenes se supone que la pendiente de la parcela es constante y que todos los árboles se encuentran situados en el mismo plano que el conjunto trípode - cámara (Figura 1), de otro modo la estimación de distancias tendría un error superior. Esta suposición, no obstante, no afecta a la medida del diámetro normal.

Para trabajar y visualizar las imágenes panorámicas 360° de las parcelas inventariadas se ha empleado una herramienta propietaria desarrollada por PANOimagen S.L. que permite la visualización completa de la imagen (visión 360° · 180°) y además proporciona información angular de las imágenes, lo que facilita la obtención del número de píxeles para el cálculo de las distancias.

Los estadígrafos analizados en este caso son el sesgo (BIAS) y el error cuadrático medio (RMSE), ambos en valor absoluto y relativo, de las de las estimaciones de la distancia y el diámetro normal a partir de imágenes panorámicas 360°:

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \text{ [ec. 5]}$$

$$BIAS\% = \frac{BIAS}{\bar{y}} \cdot 100 \text{ [ec. 6]}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \text{ [ec. 7]}$$

$$RMSE\% = \frac{RMSE}{\bar{y}} \cdot 100 \text{ [ec. 8]}$$

Donde n es el tamaño de la muestra, y_i es el valor observado de la variable analizada para el árbol i , \hat{y}_i es el valor estimado de la variable analizada del árbol i a partir de las imágenes y finalmente \bar{y} es la media observada de la variable en cuestión. El análisis estadístico se ha realizado en el entorno R (R Core Team, 2016).

4. Resultados

Las imágenes panorámicas obtenidas (Figura 2) en alto rango dinámico (HDR) presentaron una resolución total de 51,21 MegaPíxeles ($10.120 \cdot 5.060$ píxeles) y un campo de visión de 360° en horizontal y 180° en vertical. Nótese que tanto para el caso de la resolución como para los ángulos de visión la relación horizontal/vertical es 2/1. La resolución angular de las imágenes analizadas es de $0,03557^\circ/\text{pixel}$.

Sobre las imágenes panorámicas 360° se realizaron las medidas correspondientes sobre 46 pies de los 50 medidos en campo, dado que algunos no eran visibles en las fotografías, debido a que otros individuos los tapaban y no era posible obtener una visual clara.



*Figura 2. Imagen panorámica 360° de una parcela empleada para la medición de distancias y de diámetros normales de individuos de *Populus x euramericana* con proyección equirectangular. Los árboles utilizados en el estudio se distinguen por un marcador numérico introducido digitalmente en la imagen a la altura normal (1,3 m).*

Se contaron los píxeles que ocupaban las secciones normales (situadas en la horizontal de la cámara gracias al posicionamiento de la cámara a 1,30 m) para calcular el diámetro y el número de píxeles existentes entre estas secciones normales y la base de los pies, para el cálculo de las distancias a las que se sitúan los distintos individuos inventariados, sobre las imágenes panorámicas para la obtención de las variables de interés, mediante las ecuaciones ec.3 y ec.4 se obtuvieron los valores de las distancias (Dist) y del diámetro normal (DAP). Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 1, donde se incluye el valor del sesgo (BIAS) y del error cuadrático medio (RMSE) de acuerdo con las ecuaciones ec.5, ec.6, ec.7 y ec.8.

Tabla 1. Variables analizadas sobre las imágenes ($Dist$ (m): Distancia al árbol medida en campo en metros; \widehat{Dist} (m): Distancia al árbol calculada sobre las imágenes en metros; DAP (cm): Diámetro a la altura del pecho medido en campo en centímetros; \widehat{DAP}_{Dist} (cm): Diámetro a la altura del pecho en centímetros medido sobre las imágenes a partir de la distancia tomada en campo; $\widehat{DAP}_{\widehat{Dist}}$ (cm): Diámetro a la altura del pecho en centímetros medido sobre las imágenes a partir de la distancia calculada sobre las imágenes).

Parámetro	Dist (m)	\widehat{Dist} (m)	DAP (cm)	\widehat{DAP}_{Dist} (cm)	$\widehat{DAP}_{\widehat{Dist}}$ (cm)
Máx.	22,6	28,6	43,3	44,4	49,8
Media	13,7	14,9	34,2	34,1	36,0
Min.	3,5	3,3	16,9	19,8	25,9
Desviación estándar	6,5	11,7	5,3	5,1	10,9
CV%	45,4	68,9	15,5	15,0	28,6
RMSE	-	2,3	-	1,9	4,3
RMSE%	-	15,9	-	5,5	11,9
BIAS	-	1,3	-	- 0,1	1,9
BIAS%	-	8,8	-	- 0,4	5,3

Como puede observarse (Tabla 1) las medidas de las distancias realizadas sobre las imágenes panorámicas 360° presentan un RMSE de 2,3 m (15,9 %) y un sesgo (BIAS) de 1,3 m (8,8 %).

Las medidas del diámetro a partir de las distancias obtenidas de las imágenes panorámicas ($\widehat{DAP}_{\widehat{Dist}}$) presentan un error cuadrático medio de 4,3 cm (11,9%), por el contrario, las medidas del diámetro normal de los árboles a partir de la distancia medida en campo (\widehat{DAP}_{Dist}) presentan un RMSE 1,9 cm (5,5%). Se aprecia una diferencia entre los dos casos de medición del diámetro, obteniéndose mejores resultados a la hora de estimar el diámetro normal a partir de la distancia medida en campo que en el caso de emplear la medida de la distancia obtenida de las propias imágenes, debido a que el error cometido en el cálculo de la distancia se propaga al cálculo del diámetro.

Hay que destacar, además, que tanto las medidas de la distancia obtenidas de las imágenes (\widehat{Dist}), como las medidas del diámetro normal a partir de la distancia tomada en las propias imágenes ($\widehat{DAP}_{\widehat{Dist}}$) se encuentran sesgadas, a diferencia de las medidas del diámetro normal a partir de las distancias a los individuos tomadas en campo (\widehat{DAP}_{Dist}), para las cuales el sesgo es casi nulo.

En la Figura 3 se muestra el gráfico de dispersión para las distancias medidas sobre las imágenes, enfrentando la distancia observada frente a la estimada mediante el análisis geométrico de las imágenes. Se ha ajustado un modelo lineal, que se muestra en verde (Figura 3) ($Dist \sim \widehat{Dist}$) y el ajuste es bueno ($R^2 = 0,949$) con un bajo Error Residual Estándar ($RSE = 1,341$ m). Se observa (Figura 3) como las estimaciones para distancias menores de 15 -20 metros difieren de las estimaciones a partir de 20 metros, siendo peores las estimaciones a mayor distancia.

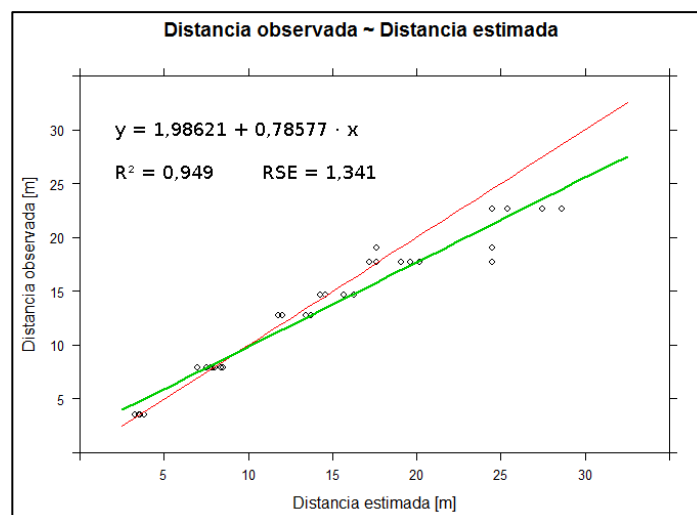


Figura 3. Gráfico de los valores observados frente a los valores estimados de las distancias (en verde modelo lineal con su ecuación ajustada, en rojo la recta $Y = X$).

En la Figura 4 se muestra una dispersión del error ($Dist - \widehat{Dist}$) en función de la distancia observada ($Dist$), observándose que las estimaciones son buenas hasta distancias mayores a 15 metros, a partir de lo cual las estimaciones son por defecto.

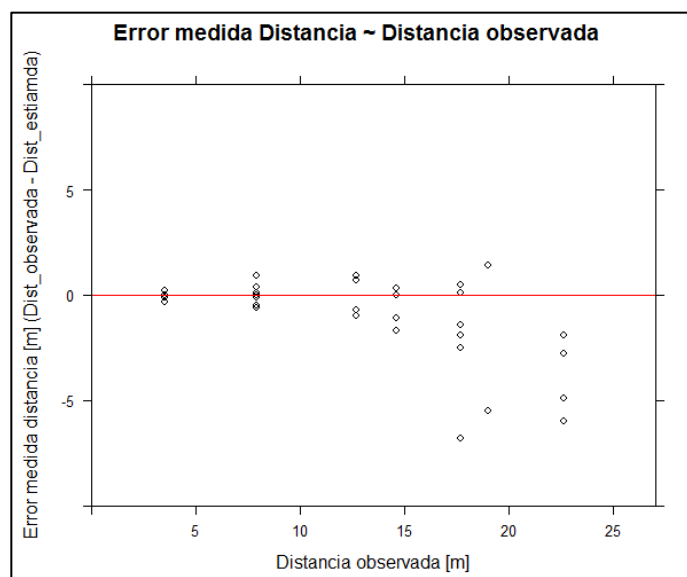


Figura 4. Error cometido en la medida de las distancias sobre las imágenes panorámicas en función de la distancia observada (en rojo la recta horizontal $Y = 0$).

Se observa en la dispersión del error en el cálculo de las distancias (Figura 4) como las estimaciones de la distancia son por exceso en términos generales para distancias mayores de 15 metros ($Dist - \widehat{Dist} < 0$), dado que se contabilizan menos píxeles de los reales a la hora de medir entre la sección normal y la base del árbol, posiblemente por la presencia de hojarasca y/o vegetación herbácea.

En la Figura 5 se muestran las dispersiones para las medidas del diámetro normal, observándose que las medidas del diámetro a partir de las distancias de campo (\widehat{DAP}_{Dist}) son más precisas que las medidas del diámetro a partir de las distancias obtenidas de las propias imágenes ($\widehat{DAP}_{\widehat{Dist}}$). El coeficiente de bondad del ajuste para el caso del diámetro estimado a partir de la

distancia medida sobre las imágenes (\widehat{DAP}_{Dist}) es bajo ($R^2 = 0,505$) frente al caso del diámetro estimado a partir de la distancia tomada en campo (\widehat{DAP}_{Dist}) que presenta un coeficiente de bondad del ajuste bastante alto en comparación ($R^2 = 0,874$).

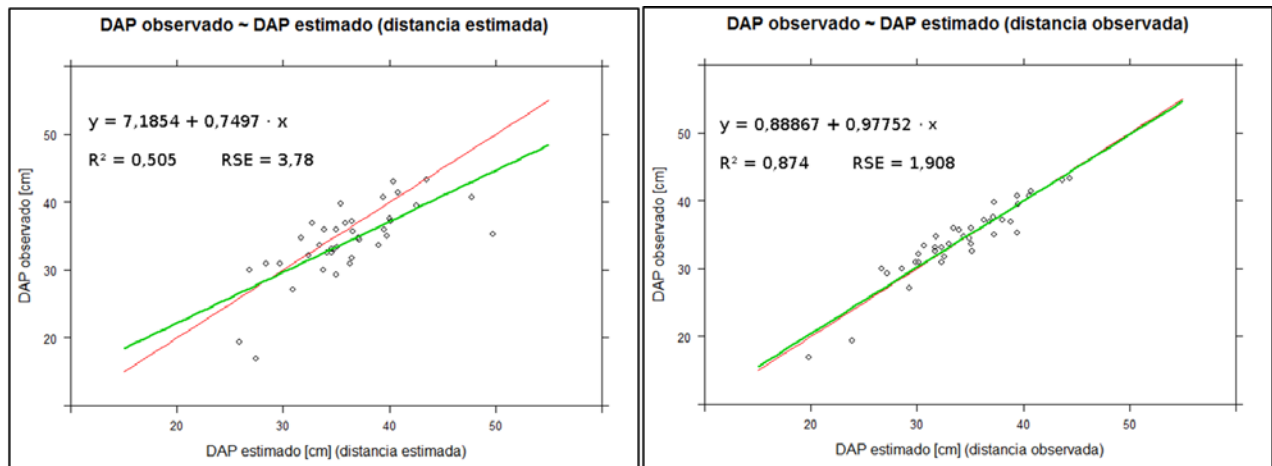


Figura 5. Resultados en la estimación del diámetro normal a partir de las imágenes. A la izquierda diámetro estimado con la distancia obtenida de las imágenes (\widehat{DAP}_{Dist}). A la derecha diámetro estimado a partir de la distancia tomada en campo (\widehat{DAP}_{Dist}) (En verde modelo lineal con su ecuación ajustada, en rojo la recta $Y = X$).

Como se puede observar (Figura 5) se obtienen mejores estimaciones del diámetro a empleando la distancia medida en campo, dado que el error cometido en la medición de la distancia no se propaga a la medición del diámetro.

El error cometido en la medición del diámetro ($DAP - \widehat{DAP}_{Dist}$) aumenta conforme los individuos se encuentran más alejados (Figura 6), al igual que ocurre para el error cometido en la medida de la distancia (Figura 4).

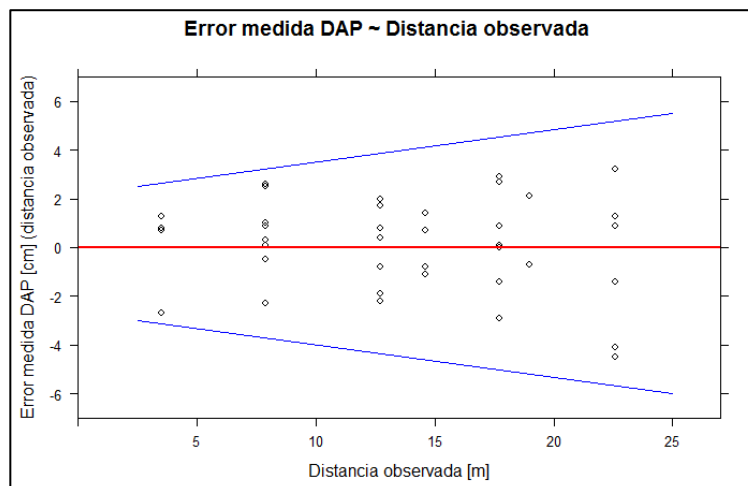


Figura 6. Error cometido en la medida del diámetro ($DAP - \widehat{DAP}_{Dist}$) en función de la distancia observada. En rojo recta horizontal $Y = 0$. En azul rectas que simbolizan el aumento del error en función de la distancia.

Debido a que los errores para los pies situados a más de 15 metros aumentan considerablemente, se ha procedido a rehacer el estudio únicamente para los pies que se encuentran a menos de 15 metros de distancia ($Dist < 15$ metros). Tras eliminar del estudio los pies situados a más de 15 metros del centro de la parcela, quedan 24 pies, lo que es un tamaño de muestra bajo. Al limitar el tamaño de la parcela a un radio de 15 metros, se mejora el error cuadrático medio de las predicciones en todos los casos, mejorando también los valores del sesgo, excepto para el caso del

diámetro estimado a partir de las distancias medidas en campo (\widehat{DAP}_{Dist}). En el caso de los modelos ajustados se mejoran también los parámetros de los ajustes. Las diferencias se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Diferencias obtenidas al limitar la parcela a un radio de 15 metros frente al caso global, en el cual no se consideraba distancia máxima. ($Dist$ (m): Distancia al árbol medida en campo en metros; \widehat{Dist} (m): Distancia al árbol calculada sobre las imágenes en metros; DAP (cm): Diámetro normal medido en campo en centímetros; \widehat{DAP}_{Dist} (cm): Diámetro normal en centímetros medido sobre las imágenes a partir de la distancia calculada sobre las imágenes; \widehat{DAP}_{Dist} (cm): Diámetro normal en centímetros medido sobre las imágenes a partir de la distancia tomada en campo)

Parámetros	Global				Dist < 15 metros			
	RMSE	RMSE%	BIAS	BIAS%	RMSE	RMSE%	BIAS	BIAS%
$Dist \sim \widehat{Dist}$	2,4	15,9	1,3	8,8	0,7	5,1	0,4	2,9
$DAP \sim \widehat{DAP}_{Dist}$	4,3	11,9	1,9	5,3	2,6	7,6	0,5	1,4
$DAP \sim \widehat{DAP}_{Dist}$	1,9	5,5	-0,1	-0,4	1,5	4,4	-0,2	-0,7
Modelos	R²		RSE		R²		RSE	
$Dist \sim \widehat{Dist}$	0,949		1,341		0,976		0,606	
$DAP \sim \widehat{DAP}_{Dist}$	0,505		3,780		0,585		2,399	
$DAP \sim \widehat{DAP}_{Dist}$	0,874		1,908		0,848		1,450	

Como se puede observar los resultados limitando el tamaño de la parcela mejoran considerablemente, especialmente para el caso de las distancias, pasando de un RMSE de 2,4 m (15,9 %) a un valor de 0,7 m (5,1 %) y para el caso del sesgo, se pasa de un valor de 1,3 m (8,8 %) a 0,4 m (2,9 %), lo que supone una reducción considerable del mismo. No obstante, la mejora no es tan notable en el caso del modelo ajustado para el diámetro estimado a partir de las distancias estimadas ($DAP \sim \widehat{DAP}_{Dist}$), mejorándose el error residual estándar (RSE) pasando de 3,780 cm a 2,399 cm al limitar la parcela a 15 metros de radio. Para el sesgo se pasa de un valor de 1,9 cm (5,3 %) a 0,5 cm (1,4 %). El coeficiente de bondad del ajuste en este caso mejora ($R^2 = 0,505 \rightarrow R^2 = 0,585$), sin embargo, la mejora es pequeña, no situándose este valor por encima de valores recomendables ($R^2 > 0,75$).

Hay que destacar el caso del diámetro estimado a partir de la distancia de campo o distancia observada ($DAP \sim \widehat{DAP}_{Dist}$), para el cuál se empeora el coeficiente de bondad de ajuste al limitar el radio de la parcela a 15 metros, mejorándose no obstante el RSE y el error cuadrático medio (RMSE), pero empeorando en términos de sesgo.

El error en la medida de la distancia al árbol aumenta con una mayor tasa a partir de los 15 metros (Figura 4). Lo mismo ocurre con el diámetro (DAP), cuanto más lejos se sitúe el árbol, mayor error se comete en su medida (Figura 6). A mayor distancia los errores son mayores, tanto para la medición de las distancias como para el caso del diámetro, principalmente por un motivo que tiene relación con la resolución de la imagen. Un ejemplo se muestra en la siguiente imagen (Figura 7), dónde se observa una pérdida importante de resolución en función de la distancia, sobre unos patrones ajedrezados colocados sobre los árboles. En este caso el mismo patrón de 10 · 10 cm ocupa 49 píxeles a 3,5 metros, 21 píxeles a 8 metros y 13 píxeles a 12,7 metros, lo que supone una considerable reducción de la resolución conforme aumenta la distancia, lo que supone una resolución de 0,20 cm/píxel a 3,5 metros, 0,48 cm/píxel a 8 metros y 0,77 cm/píxel a 12,7 metros.



Figura 7. Pérdida de resolución de la imagen con la distancia. De izquierda a derecha patrón de 10*10 cm visto en la imagen panorámica 360° de alta resolución a 3,5 m (49 píxeles), 8 m (21 píxeles) y 12,7 m (13 píxeles).

A mayor distancia del árbol, un menor número de píxeles ocupan su sección para un mismo tamaño del individuo, por ello es cada vez más complicado delimitar el ancho del árbol sobre la imagen, así como para el conteo de píxeles para el cálculo de la distancia. Esto se traduce en mayores errores a mayores distancias, por ello es importante el trabajar con imágenes con alta resolución, para minimizar lo máximo posible este problema.

5. Discusión

Los resultados presentados en este trabajo demuestran la posibilidad de aplicar técnicas de visión artificial y tratamiento de imagen al inventario forestal, como otros estudios han afirmado (Shimizu et al., 2014). Es necesario, no obstante, desarrollar una metodología que permita reducir lo máximo posible los errores cometidos.

En el estudio presentado se obtiene un error cuadrático medio (RMSE) de 2,6 cm (7,6 %) para el cálculo del diámetro a partir de la distancia obtenida sobre las imágenes y de 1,5 cm (4,4 %) mediante la distancia medida en campo en parcelas de 15 metros de radio. Para parcelas mayores los errores cometidos en el diámetro normal aumentan hasta valores máximos de 4,3 cm (a partir de la distancia medida sobre la propia imagen).

La resolución con la que se ha trabajado se considera la adecuada para tamaños máximos de parcela de 15 metros, siendo esta de 0,20 cm/píxel a 3,5 metros y de 0,77 cm/píxel a 12,7 metros, superior a 1 cm/píxel, que es la empleada por Varjo et al. (2006) en un estudio para el cálculo de variables forestales a partir de imágenes en Finlandia mediante imágenes individuales, obteniendo unos valores del sesgo de -0,6 y -2,8 mm y valores de 7 a 9,4 mm de RMSE a partir de la distancia al árbol medida con un dispositivo láser. Debido a que se emplean fotos individuales, es necesario realizar una calibración de la cámara dado que las imágenes no representan las dimensiones reales por la distorsión de la lente (Varjo et al., 2006). En el caso de las imágenes panorámicas de 360°, la calibración se realiza de forma implícita durante la reconstrucción de la imagen panorámica en 360°, lo que es una ventaja.

En el estudio presentado por Shimizu et al. (2014) se obtienen unos errores máximos de 1,45 cm (7 %) en la medida del diámetro, con valores medios del error del 2 al 4 %. En este caso las fotografías se capturan con un teleobjetivo para mejorar la resolución, resultados muy similares a los presentados en este estudio.

Rodríguez-García et al., 2014, realiza medidas a partir de imágenes hemisféricas estereoscópicas en plantaciones de *Eucalyptus globulus*. Mediante parcelas de 15 metros de radio se calcula la posición de los árboles con un RMSE de 0,23 m (8,95 %) y el diámetro normal de los árboles con un RMSE de 1,51 cm (10,43 %). En nuestro caso, para parcelas de hasta 15 metros de radio obtenemos un RMSE de 2,6 cm (7,6 %) en la estimación del diámetro normal a partir de la distancia medida sobre la imagen y de 1,5 cm (4,4 %) a partir de la distancia tomada en campo. En el caso de la distancia, el error del posicionamiento de los árboles logrado en nuestro estudio es mayor (RMSE = 0,7 metros).

En otros estudios (Vastaranta et al., 2015) se ha estimado el diámetro de los árboles mediante aplicaciones móviles con valores de sesgo del -1,4 al 3,1 % y de RMSE del 5,2 % al 11,6 %, valores ligeramente superiores a los obtenidos mediante imágenes panorámicas 360°.

6. Conclusiones

Las imágenes panorámicas 360° suponen una herramienta útil y adecuada para la estimación de variables forestales tales como el diámetro normal y para otras variables como el área basimétrica y el volumen de madera (Fastie, 2010). Además, gracias a los avances de las técnicas de visión artificial es posible automatizar las mediciones mediante técnicas de segmentación de imagen, lo que reduce considerablemente el tiempo empleado. Por otro lado, además las imágenes panorámicas 360° de alta resolución suponen un importante registro gráfico, que puede ser consultado en gabinete, y sobre el que es posible repetir mediciones, sin tener que replantear la parcela de campo. Además, permiten visualizar características de la misma (calidad, matorral, pedregosidad, daños bióticos y abióticos, ...) e incluso puede emplearse para detectar cambios en la composición y estructura de la misma en inventarios sucesivos, si se estaciona en el mismo punto con cierto desfase temporal (Smith, 2010).

Se encontraron, una serie de inconvenientes en la medición de las distancias y en la medición de los diámetros sobre las imágenes panorámicas 360° de alta resolución:

- Presencia de árboles, pertenecientes a la parcela, no visibles en las imágenes por lo que no es posible efectuar mediciones sobre ellos.
- Árboles cuya base no presentaba buena visual por la presencia de hojarasca y otros vegetales como arbustos, lo que complica obtener la distancia a la que se sitúa respecto al centro de la parcela.
- El número de píxeles pertenecientes a las secciones de los árboles se va reduciendo considerablemente conforme nos alejamos del centro de la parcela, lo que hace que se reduzca notablemente la precisión en las medidas y se aumenten los errores.
- La parcela debe tener pendiente constante si se desea medir la distancia sobre la foto, aspecto no necesario para estimar el diámetro a partir de la distancia conocida al árbol, que es como mejor resultado se obtiene.

Como conclusión última a lo presentado en este artículo, las imágenes panorámicas 360° - 180° de alta resolución son una buena herramienta para la obtención de medidas del diámetro normal en inventarios forestales. La resolución con la que se ha trabajado (10.120 · 5.060 píxeles) se considera adecuada para tamaños de parcela menores de 15 metros de radio y estimación de distancia sobre la propia imagen. Para distancias superiores a 15m será necesario ampliar la resolución de la imagen o medir la distancia en campo para obtener resultados con suficiente precisión y con errores aceptables.

Es necesario trabajar con una resolución de imagen adecuada, dado que esta va a condicionar la calidad del registro gráfico, así como la calidad de las medidas realizadas sobre la misma, perjudicando, no obstante, en el coste de su obtención, en el peso de la imagen, el espacio que ocupa y la proporción de software que se emplea para su manipulación.

7. Bibliografía

FASTIE, C.L.; 2010. Estimating stand basal area from forest panoramas. Fine International Conference on Gigapixel Imaging for Science. 8 pp. Cleveland

HUGIN-Panorama-Photo-Sticher, Versión 2016.2.0.be8da0221960.
URL: <http://hugin.sourceforge.net/> (16/01/2017; 10:19 a.m.)

JUUJÄRVI, J.; HEIKKONEN, J.; BRANDT, S.S.; LAMPINEN, J.; 1998. Digital-image-based tree measurement for forest inventory. *Proc. SPIE 3522, Intelligent Robots and Computer Vision XVII: Algorithms, Techniques and Active Vision*, 84, 10 pp. Boston

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P.; 1997. Mensura forestal. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 586 pp.

R Core Team; 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>. (16/01/2017; 10:20 a.m.)

RODRÍGUEZ-GARCÍA, C.; MONTES, F.; RUIZ, F.; CAÑELLAS, I.; PITA, P.; 2014. Stem mapping and estimating standing volumen from stereoscopic hemispherical images. *Eur J Forest Res* Vol 133(5). 895-904

SHIMIZU, A.; YAMADA, S.; ARITA, Y.; 2014. Diameter Measurements of the Upper Parts of Trees Using an Ultra-Telephoto Digital Photography System. *Open Journal of Forestry*, 4, 316-326

SIIPILEHTO, J.; LINDEMAN, H.; VASTARANTA, M.; YU, X.; UUSITALO, J.; 2016. Reliability of the predicted stand structure for clear-cut stands using optional methods: airborne laser scanning-based methods, smartphone-based forest inventory application Trestima and pre-harvest measurement tool EMO. *Silva Fennica* Vol 50 (3) 24 pp

SIXTO, H.; HERNÁNDEZ, M^a.J.; CIRIA, M^a.P.; CARRASCO, J.E.; CAÑELLAS, I.; 2010. Manual de cultivo de *Populus* spp. Para la producción de biomasa con fines energéticos. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). 60 pp. Madrid

SMITH, M.A.; 2010. A Year in an Urban Forest. Fine International Conference on Gigapixel Imaging for Science. 11 pp

THOMAS, B.; 2012. Measuring Tree Diameter. *Kentucky Woodlands Magazine*. Vol 7 (1). 10-11

VARJO, J.; HENTTONEN, H.; LAPPI, J.; HEIKKONEN, J.; JUUJÄRVI, J.; 2006. Digital horizontal tree measurements for forest inventory. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute*, 40. 23 pp

VASTARANTA, M.; GONZÁLEZ, E.; LUOMA, V.; SAARINEN, N.; HOLOPAINEN, M.; HYYPPÄ, J.; 2015. Evaluation of a Smartphone App for Forest Sample Plot Measurements. *Forests* 6, 1179-1194