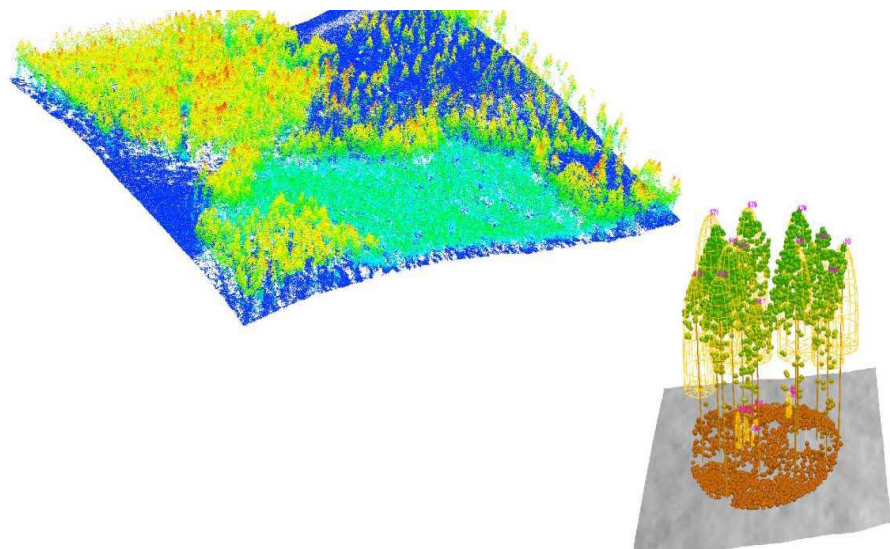


ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS FORESTALES MEDIANTE DATOS LIDAR



INDICE

1. Definición de objetivos.-----	4
2. Descripción del proyecto.-----	5
2.1.- LIDAR.-----	5
2.2.- Definición de MDE, aplicaciones y métodos de captura.-----	7
2.3.- Modelos de datos para el MDE.-----	10
2.4.- Algoritmos de filtrado de puntos.-----	11
2.5.- Factores que afectan a la precisión de un MDE.-----	13
2.6.- Cálculos de MDS y MDV.-----	15
3. Estimación de variables forestales a partir de datos LiDAR.-----	17
4. Materiales y métodos.-----	18
4.1.- Zona de estudio.-----	18
4.2.- Datos utilizados.-----	20
5. Cálculo de modelos digitales y datos estadísticos.-----	24
5.1.- Programas utilizados.-----	24
5.2.- Procesado de datos.-----	24
5.2.1.- Crear un proyecto FUSION.-----	24
5.2.2.- Crear y cargar la imagen de referencia.-----	25
5.2.3.- Catálogo de funciones.-----	25
5.2.4.- Cargar de datos LiDAR.-----	25
5.2.5.- Filtrado de puntos para obtener los datos de tierra desnuda.---	25
5.2.6.- Crear un Modelo Digital de Superficie de Tierra Desnuda.-----	26
5.2.7.- Crear un Modelo Digital de Superficie de Vegetación.-----	27

5.2.7.1.- Canopy Surface Model (CSM).-----	27
5.2.7.2.- Canopy High Model (CHM).-----	27
5.2.8.- Estimación del cálculo de Cobertura de Dosel.-----	27
5.2.9.- Estimación del cálculo de Densidad de Vegetación.-----	28
5.2.10.- Extracción de Parámetros Forestales.-----	29
6.Estimación comparativa de parámetros forestales.-----	30
6.1.-Compendio de datos.-----	30
6.2.- Clasificación de datos.-----	31
6.3.- Primer retorno.-----	35
6.4.- Modelo Digital de Superficie Desnuda.-----	39
6.5.- Modelo Digital de Superficie de Copa (CSM).-----	40
6.6.- Modelo Digital de Altura Media de Copa (CHM).-----	41
6.7.- Modelo Digital de Cobertura de Dosel.-----	42
6.8.- Modelo Digital de Densidad de Vegetación.-----	43
7.Cálculo parámetros forestales.-----	44
8.Conclusiones.-----	46
9.Bibliografía.-----	48

1.- Definición de objetivos.

El presente estudio tiene como objetivo comparar los vuelos LiDAR realizados sobre una zona concreta del País Vasco mediante la estimación de diferentes parámetros forestales calculados sobre la vegetación de la zona.

Se estudiarán las características técnicas propias de cada vuelo y se calcularán diferentes modelos digitales de superficie y vegetación que nos permitan apreciar las diferencias. Las mediciones se llevarán a cabo procesando por separado los datos recogidos en los vuelos de 2008 y 2012, que son los únicos que se han realizado en todo el País Vasco hasta la fecha.

También es objetivo de este trabajo comprobar la idoneidad de los programas FUGRO Y FUSION para el manejo y procesado de datos LiDAR.

2.- Descripción del proyecto.

2.1.- LIDAR.

La tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging), es un sistema activo de teledetección que se basa en la medición del tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso de energía y su llegada al sensor, después de haber sido reflejado por algún elemento de la superficie terrestre. Estos datos contienen información de las coordenadas de los puntos donde se producen las reflexiones, tanto si se produce en el suelo como en cualquier objeto que sobresalga de la superficie terrestre, como es el caso de la vegetación y edificios. Con esta información es posible transformar los datos registrados en alturas y estudiar su distribución para obtener datos de la cubierta forestal, de cualquier otro objeto por encima de la superficie terrestre y definir la topografía del suelo. De esta manera se pueden obtener diferentes modelos digitales: Modelo Digital de Elevación (MDE), Modelo Digital de Superficie, Modelo Digital de la Vegetación (MDV) y sus derivados. Estos datos son aplicados en áreas como por ejemplo: creación de modelos hidrológicos (Cobby et al., 2001; Casas et al., 2006), extracción de edificios (Sohn y Dowman, 2007), cambios en la arena de la playa (Shrestha et al., 2005) y, fundamentalmente, aplicaciones forestales (Li et al., 2008; García et al., 2010).

Para el cálculo del MDE a partir de datos LiDAR, es necesario utilizar algoritmos que permitan descartar de entre todos los puntos, aquellos que no pertenecen al suelo como los que representan vegetación, edificios o cualquier otro elemento que sobresale sobre esta superficie. Este proceso, denominado **filtrado**, ha sido estudiado a partir de diferentes algoritmos que suelen proporcionar buenos resultados en zonas de campo con poca pendiente. Sin embargo, los resultados son peores en áreas urbanas, con superficies rugosas y con vegetación (Sithole y Vosselman, 2004).

El sistema LiDAR ha sido ampliamente utilizado en el ámbito forestal para estimar variables que caracterizan árboles, variables dendrométricas, y otras relacionadas con los bosques, variables dasométricas como la altura, la biomasa y el volumen (Lefsky et al., 1999; Næsset 2002; Maltamo et al., 2004; Popescu et al., 2007). La biomasa es una variable importante para evaluar el ecosistema y la estructura a lo largo del paisaje (Zheng et al., 2004) y permite estimar la cantidad de carbono

retenida por la vegetación y el material celuloso como fuente potencial de energía renovable (Popescu et al. 2007). Por otro lado, la altura es una variable que permite clasificar los diferentes tipos de vegetación arbustiva (Riaño 2007), es importante para detectar crecimientos y muestra una correlación muy alta con la biomasa. Esto se pudo observar en diversos estudios como los realizados por Hyypä e Inkinen (1999), Lim et al., (2003) y Nelson et al., (2004) que trabajaron en zonas con presencia de árboles.

En contraste, las zonas arbustivas han sido objeto de pocas investigaciones por su dificultad técnica (baja altura y superficie uniforme). En el caso de los árboles se han seguido dos enfoques (Hyypä et al., 2008): estimación de variables dasométricas a partir del cálculo de regresiones entre los datos de campo y estadísticos derivados de los datos LiDAR en una parcela que han sido referenciados a la superficie topográfica (Nelson et al., 1998; Naesset et al., 2004; Andersen et al., 2005; Li et al., 2008; García et al., 2010); y estudios en los que se estiman propiedades físicas de árboles a partir de la extracción de las copas mediante la distribución de las alturas de los datos LiDAR que también han sido referenciados a la superficie topográfica (Hyypä et al., 2001; Holmgren et al., 2003; Persson et al., 2002; Maltamo et al., 2004; Popescu, 2007). De esta manera, la altura de cada punto LiDAR indica la distancia a la superficie del suelo.

2.2.- Definición de MDE, aplicaciones y métodos de captura.

2.2.1.- Definición de MDE.

Según Felicísimo (1994) “un Modelo Digital de Elevaciones es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno”. Aunque esta definición suele utilizarse para referirse a la distribución de las elevaciones del terreno, también se puede encontrar en la bibliografía reciente (Koukoulas et al., 2004; Reutebuch, 2005; Evans et al., 2007) el término modelo digital de elevaciones (MDE) para expresar tal distribución y diferenciarlos de otros modelos que describen diferentes características del terreno (Doyle, 1978; Burrough y McDonnell, 1998).

2.2.2.- Aplicaciones de MDE.

Los modelos digitales de elevaciones tienen muchas aplicaciones. Entre ellas se encuentra la generación de modelos hidrológicos, cuencas hidrográficas, estudios de vegetación, cartografía de riesgos de inundación, modelos de propagación de incendios forestales, estudios de cuencas visuales, generación de perfiles del terreno, cálculo del movimiento de tierras y generación de modelos derivados como son el mapa de pendientes, orientaciones y rugosidad del terreno.

2.2.3.- Métodos de captura de datos.

Existen diferentes técnicas para la captura de esta variable geográfica. Felicísimo (1994) establece una clasificación de los métodos de captura en directos o secundarios.

- DIRECTOS: se mide la altura directamente a través de una estación total, un GPS o los altímetros radar o láser.
- SECUNDARIOS: se obtiene la altura tras aplicar procesos fotogramétricos sobre fotografías aéreas o imágenes de satélite con recubrimiento. También se pueden obtener datos de manera indirecta a partir de la interferometría radar y la digitalización automática o manual de curvas de nivel y puntos acotados sobre cartografía existente.

Si realizamos un estudio comparativo entre estos sistemas y LIDAR podemos establecer las siguientes diferencias:

- ESTACIONES TOTALES Y EQUIPOS GPS.

VENTAJAS: permiten definir con precisión elementos de la superficie, los puntos se distribuyen de manera más eficiente y se pueden repetir las medidas.

DESVENTAJAS: resultan poco adecuados para superficies grandes y de difícil acceso, como las áreas forestales.

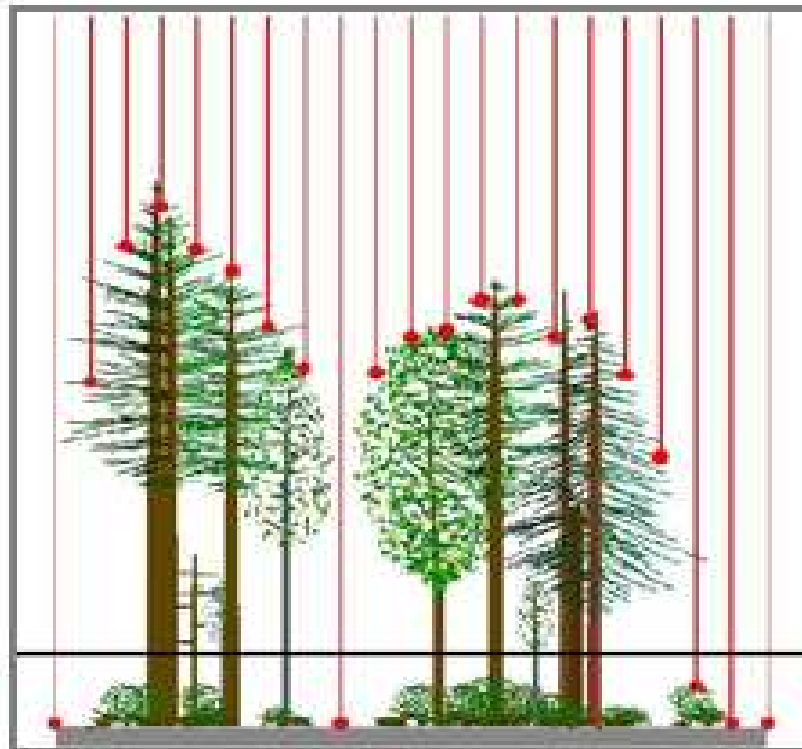
- TÉCNICAS FOTOGRAMÉTRICAS.

DESVENTAJAS: las zonas de sombra no se miden correctamente e inducen a errores graves (Andersen et al., 2007); además, en los casos de vegetación densa, la medición de las alturas de los árboles es menos precisa y la capacidad de penetración menor (Hyde et al., 2006). En estos casos es necesario localizar zonas abiertas para medir la elevación del suelo, pudiéndose encontrar a una distancia demasiado grande del árbol cuya altura se quiere medir (St-Onge et al., 2004); también es necesario que los puntos aparezcan en dos imágenes y hay que establecer puntos de apoyo sobre el terreno para georreferenciar los datos tomados (Kraus y Pfeifer, 1998).

Según este análisis podemos concluir sobre el sistema LIDAR:

- Proporcionan mayor densidad de puntos.
- Permiten obtener datos en grandes superficies de forma fácil y rápida, incluidas zonas con vegetación, independientemente de su altura (aunque las precisiones en el cálculo del MDE y de variables forestales disminuyen en zonas densas de vegetación (Cobby et al., 2001; Raber et al., 2002; Hodgson et al., 2005), son mejores a las obtenidas en los procesos de restitución ya que entre un 20 y 40% de los pulsos pueden alcanzar el suelo (Ackermann 1999).
- Se consigue automatizar los procesos y una entrega más rápida de los datos.
- tienen la desventaja de que en zonas con presencia de agua el haz de energía tiende a ser absorbido (Huisin y Gomes, 1998) generando áreas vacías sin información, sobre todo en zonas de aguas profundas (Charlton, 2003).

- tiende a subestimar las alturas de los árboles ya que el haz de energía penetra hacia el interior de la vegetación antes de ser reflejado (Magnussen et al 1999; Gaveau y Hill, 2003).
- es necesario la utilización de algoritmos adecuados que permitan separar los puntos que pertenecen al suelo de los que no, lo que suele ser difícil en áreas cubiertas de vegetación sobre terrenos con pendientes elevadas.



2.3.- Modelos de datos para el MDE.

Para obtener un MDE a partir de datos LiDAR es necesario convertir los puntos obtenidos por este sistema en una superficie continua. Para realizar esta conversión, se utilizan frecuentemente dos estructuras:

- cálculo de TINs (Triangular Irregular Nets):

Se basa en el cálculo de triángulos formados por los puntos LiDAR. Este modelo presupone que los puntos incluidos en su interior pertenecen al plano formado por los puntos del triángulo (Bosque, 1997). La elevación de cualquier punto que pertenezca al triángulo se obtiene por interpolación.

- una imagen basada en una malla regular formada por celdas (Korte, 1997).

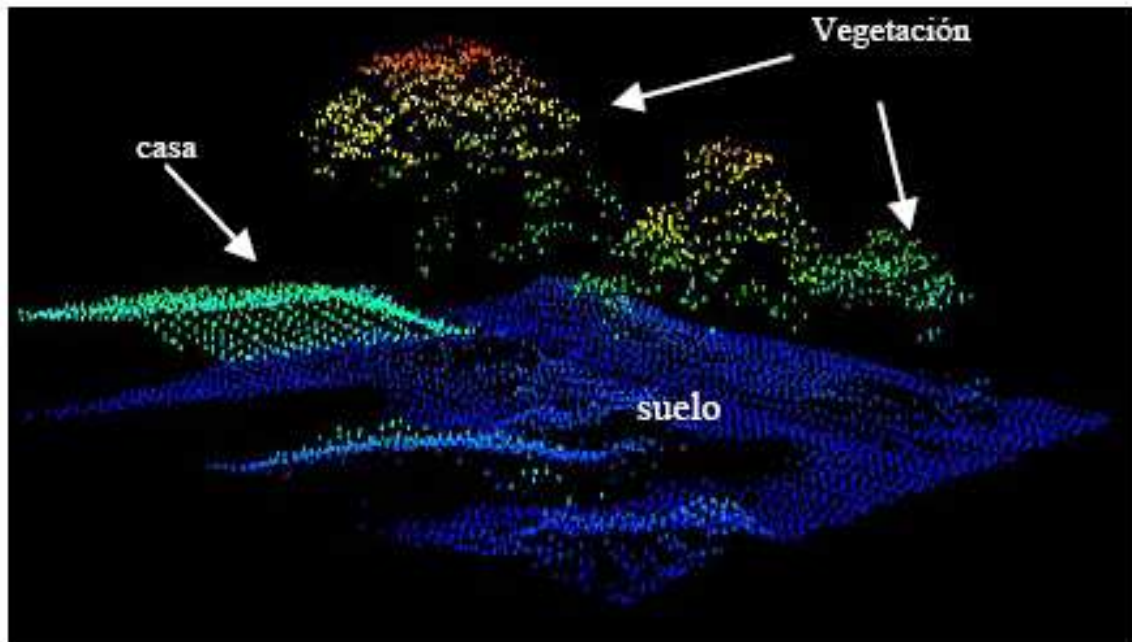
Utiliza celdas como unidades de observación y en su interior asignan un único valor de altura.

El modelo TIN tiene la ventaja de utilizar una densidad de puntos en función de la dificultad orográfica de la zona y permite seleccionar puntos críticos como cumbres, collados y líneas de cambio de pendiente (Casas et al., 2006). Por contra, las estructuras basadas en una imagen resultan más apropiadas para realizar operaciones de análisis de superposición, como la creación de modelos y detección de cambios (Burrough y McDonell, 1998).

En el caso de los datos LiDAR, en los que se dispone de una alta densidad de puntos, ambos sistemas podrían considerarse adecuados para definir un MDE, siempre y cuando se utilice un tamaño de celda pequeño para el modelo imagen.

2.4.- Algoritmos de filtrado de puntos.

Los datos que registra un sistema LIDAR contienen información de las coordenadas de los puntos donde se producen las reflexiones, tanto si se producen en el suelo como en cualquier objeto que sobresalga de la superficie terrestre, como son los casos de la vegetación y edificios.



Para obtener el MDE es necesario clasificar estos datos según pertenezcan al suelo o a objetos por encima de la superficie topográfica. Aunque este proceso, denominado filtrado, ha sido estudiado a partir de diferentes algoritmos, es muy difícil automatizarlo completamente (Baltsavias 1999).

Los algoritmos de filtrado se pueden agrupar en las siguientes clases (Sithole y Vosselman, 2004):

- **Filtro basado en el cálculo de TIN:** Sohn y Dowman (2002) realizaron una primera triangulación con los cuatro puntos mínimos más cercanos a los vértices del rectángulo que incluyó la nube original de puntos. A continuación, el punto más bajo de cada triángulo fue añadido en la siguiente triangulación. El proceso se repitió hasta que no hubiera ningún triángulo con un punto por debajo de ellos; se basó en el cálculo de un área de influencia vertical y en seleccionar aquellos puntos que generaron tetraedros más planos.

- **Filtro basado en contornos activos:** Elmqvist (2003) calculó una superficie horizontal por debajo de todos los puntos. A continuación, esta superficie se ajustó hacia arriba para encajarse con los puntos del terreno y descartar los puntos pertenecientes a la vegetación y edificios.
- **Filtros basados en interpolación:** Kraus y Pfeifer (1998) aplicaron un proceso iterativo basado en el cálculo de una superficie media usando todos los datos LiDAR; para ello aplicaron una interpolación lineal basada en el cálculo de mínimos cuadrados con un conjunto de funciones de pesos según los residuos de cada punto.
- **Filtros morfológicos:** existe un número importante de algoritmos basados en este tipo de filtros; estas operaciones se basan en la aplicación de operaciones matemáticas sobre un conjunto de puntos incluidos en una ventana que se desplaza sobre la zona de estudio y de tamaño determinado Kilian et al., (1996); dos operaciones básicas se suelen utilizar: dilatación (selección del punto de cota máxima dentro de la ventana definida) y erosión (selección del punto mínimo dentro de una ventana); combinar estas operaciones da lugar a una apertura y a un cierre. A los puntos clasificados como suelo se les asignó un peso en función de la ventana utilizada, siendo menor al utilizar ventanas grandes; una mejora de este método consistió en utilizar umbrales entre pasos.

2.5.- Factores que afectan a la precisión de un MDE.

La precisión en el cálculo del MDE a partir de datos LiDAR depende de varios factores. Hyypä et al. (2008) los agruparon en cuatro clases:

1. **Errores asociados al sistema LiDAR (GPS, INS, laser escáner):** las empresas que realizan los vuelos suelen llevar a cabo un estudio sobre la precisión de las mediciones realizadas por el equipo GPS y el sistema inercial. Una forma de validar la precisión del sistema LiDAR es analizar las diferencias entre los datos medidos en campo y los obtenidos con los datos LiDAR en zonas de control, como pueden ser las zonas llanas sin vegetación o en tejados planos (Huising y Gomes, 1998; Hopkinson et al., 2005). A veces, los valores más altos están causados por la intersección del haz de energía con aves. Estos errores se pueden eliminar a partir de la selección de los puntos con elevación superior o inferior a un percentil calculado a partir de todos los datos (Wack y Wimmer, 2002; Riaño et al., 2004).
2. **Metodología y algoritmos:** se puede encontrar una comparación y clasificación de ellos en Sithole y Vosselman (2004). De los métodos analizados, los algoritmos que utilizan superficies locales suelen dar mejores resultados ya que, de esta manera, no se eliminan las variaciones pequeñas del relieve: los algoritmos basados en procesos iterativos de búsqueda de puntos con elevación mínima en ventanas decrecientes son un ejemplo. Todos los métodos comparados por estos autores dieron buenos resultados en áreas abiertas con poca pendiente. Sin embargo, los errores aumentaron en zonas urbanas complejas y en terrenos rugosos con pendiente elevada.
3. **Características asociadas a los datos:** la precisión de un MDE depende de las características de los datos. En la adquisición de datos LiDAR se tienen que tener en cuenta una serie de parámetros entre los que se pueden citar: la altura de vuelo, frecuencia de escaneado, frecuencia de pulsación láser, ángulo de escaneado y densidad de puntos por m².

La altura de vuelo condicionará la precisión horizontal y vertical en el cálculo de las coordenadas de los pulsos. A mayor altura, menor precisión.

El ángulo de escaneado interesará que sea lo más pequeño posible; de este modo, en zonas en las que la presencia de vegetación sea muy densa y los huecos entre ella escasos, hay mayor probabilidad de que algún pulso alcance el suelo.

Una frecuencia de pulsación y de escaneado alta posibilitará la generación de una densidad de puntos LIDAR por m² alta, lo que permitirá obtener una mayor precisión del MDE.

- 4. Complejidad de la superficie terrestre:** la presencia de vegetación densa hace que sea muy difícil que algún pulso alcance el suelo, disminuyendo la precisión del MDE. Kraus y Pfeifer, (1998) afirmaron que un porcentaje inferior al 25% de los puntos LiDAR penetran en las zonas forestales y que, al aumentar la rugosidad y la pendiente del terreno, decrece la precisión en la altura de 0,5-1 m para una altura de vuelo de 1.000 m. En general, la precisión de un MDE decrece en zonas con vegetación densa y con pendientes elevadas (Raber et al., 2002; Hodgson et al., 2005; Clark et al., 2004). Según Hollaus et al., (2006), el RMSE aumentó de 0,1 m a 0,3 m cuando las pendientes pasaron del 10% al 40-50 % en una zona forestal de los Alpes austriacos con una pendiente media de 40 grados y una densidad media de 2 puntos/m².

2.6.- Cálculos de MDS y MDV.

Además de los MDE, los datos registrados por un sistema LIDAR permiten obtener Modelos Digitales de Superficies (MDS). Un MDS es una descripción geométrica de la superficie topográfica y de los objetos localizados sobre ella como árboles y edificios (Haala et al., 1999; Priestnall et al., 2000).

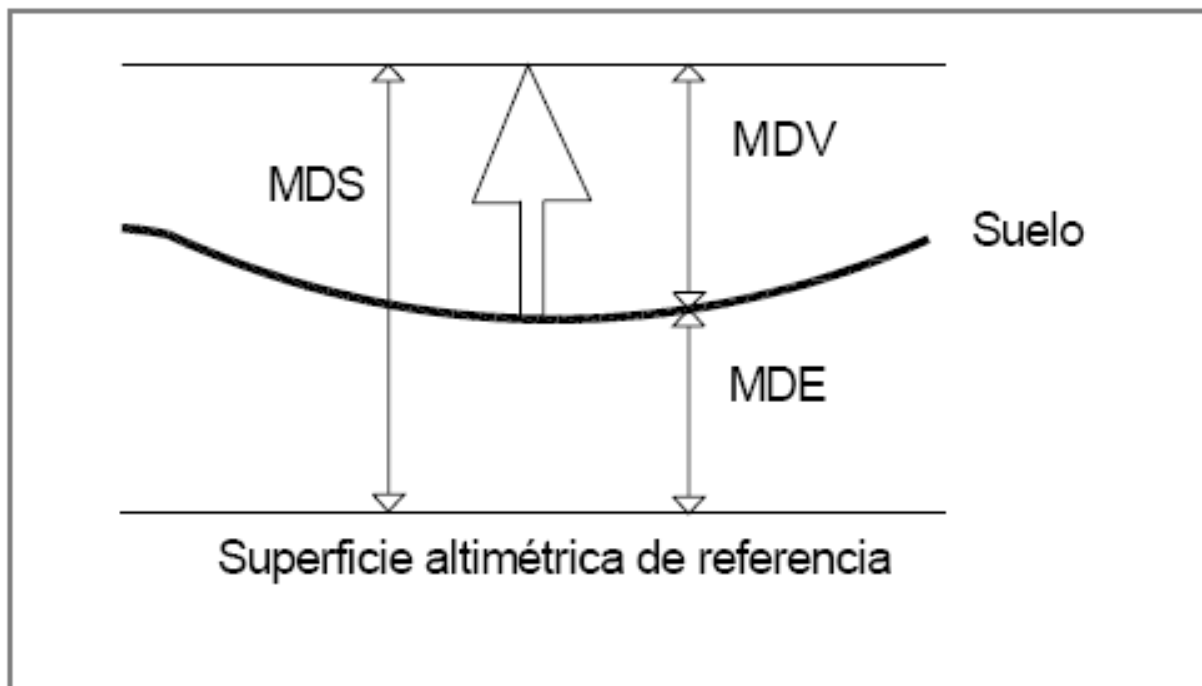
A diferencia del MDE, el MDS se calcula a partir de la selección de los puntos con elevación máxima incluidos en una celda de tamaño variable (p.ej. 0,5 m de lado). En las zonas desprovistas de datos se realizó una interpolación basada en las alturas de los puntos más cercanos. En los casos en los que una celda no tuviera ningún punto LiDAR, se le asignaba la media de las elevaciones de los píxeles contiguos.

Otros autores (Maltamo et al., 2004; Takahashi et al., 2005; Popescu et al., 2007) utilizaron sólo los datos del primer retorno para detectar los puntos con elevación máxima, utilizando un tamaño de píxel entre 0,5 y 0,66 m.

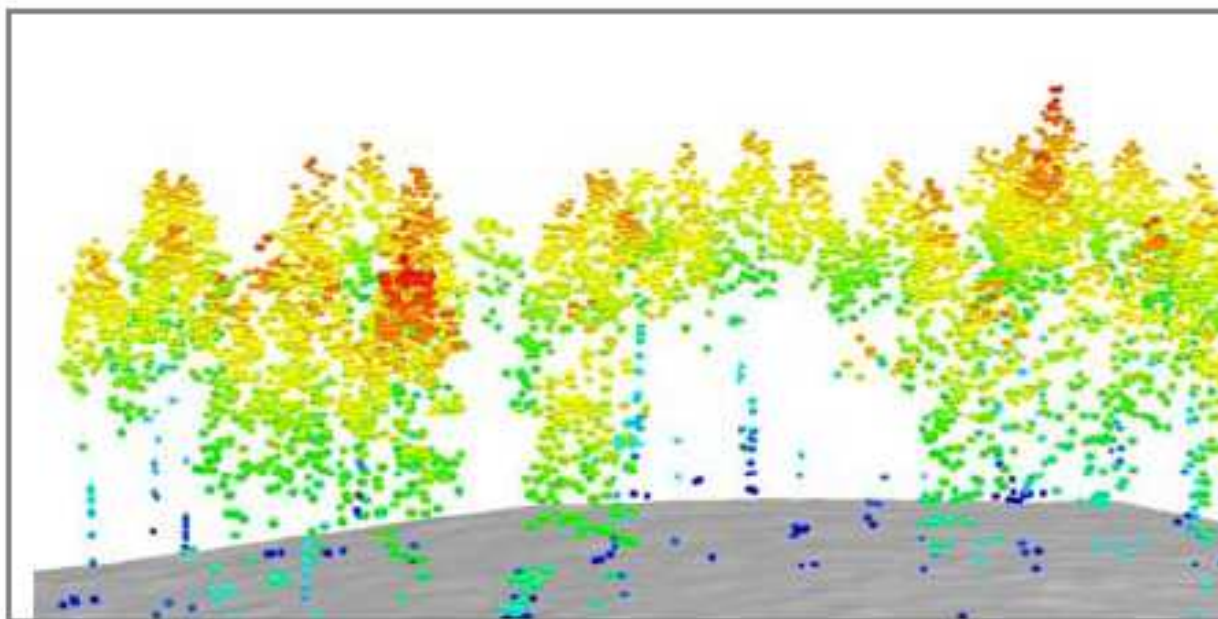
Patenaude et al., (2004) calcularon el MDS utilizando los datos del primer retorno sin selección de máximos.

A partir del MDE y del MDS puede calcularse su diferencia (MDS-MDE), que en zonas forestales representa el Modelo Digital de la Vegetación (MDV). Cada celda de esta imagen contiene la altura de la vegetación (Figura 3). El MDV es la superficie de partida para el cálculo de estadísticos con los que se puede estimar variables dasométricas (Nelson et al., 2004; Naesset 1997; Means et al., 2000; Lim et al; 2003;

Andersen et al., 2005; Kim et al., 2009; García et al., 2010). El MDV también es la superficie de partida sobre la que se aplican procesos de segmentación de imágenes a partir de los cuales pueden obtenerse características de árboles individuales (Hyypä and Inkinen, 1999; Hyypä et al., 2001b; Person et al., 2002; McCombs et al., 2003; Popescu et al., 2004; Bortolot 2005).



No todos los estudios sobre la vegetación a partir de datos LiDAR consideran el MDV para obtener variables forestales. En otros estudios (Riaño et al., 2004) se trabaja con los puntos LiDAR originales. Para calcular su altura se aplica una superposición entre los puntos y el MDE. A continuación se resta al valor de la elevación del punto la del MDE.



3.- Estimación de variables forestales a partir de datos LiDAR.

Uno de los ámbitos en los que más se están utilizando los sistemas LiDAR es en el forestal; entre las aplicaciones y líneas de investigación llevadas a cabo en este área se pueden citar:

- utilización de los sistemas LiDAR para la gestión y ordenación de montes e inventarios (Hyypä et al 2001b; Reutebuch et al., 2005; Donoghue et al., 2007)
- detección de cambios en la vegetación (Yu et al., 2004)
- conservación y análisis de hábitats (Mundt et al., 2006)
- estimación de parámetros forestales para la generación de modelos de propagación de incendios forestales (Erdody y Moskal, 2010)
- cuantificar sumideros de CO₂ en zonas forestales (García et al., 2010)

Para llevar a cabo estos trabajos se definen dos aproximaciones. Por una lado, se considera como unidad de estudio la parcela y, por otro, el árbol individual. Así, se estimarán variables dasométricas en el primer caso y dendrométricas en el segundo.

Cuando los estudios se centran considerando como unidad de análisis la parcela, se calculan estadísticos de la distribución de las alturas de los LiDAR que se utilizarán como variables independientes en los diferentes modelos de regresión. Diversos autores han demostrado que la altura media del MDV presenta una buena correlación con la altura del dosel (Naesset, 1997; Lim y Treitz, 2004; Magnussen et al., 2002). En el caso de la biomasa, además de esta variable, el coeficiente de variación muestra una correlación muy alta con la biomasa (Donoghue et al., 2007; Hudak et al., 2006; Kim et al., 2009). Además de estas variables, las estimaciones de los parámetros forestales mejoraron al considerar estadísticos obtenidos de la densidad de puntos por intervalos de alturas (Andersen et al., 2005; Van Aart et al., 2006; Li et al., 2008).

4.- Materiales y métodos.

4.1.- Zona de estudio.

El trabajo se realiza sobre una zona de la Comunidad Autónoma del País Vasco perteneciente a la provincia de Guipuzcoa, situada en la parte sur-este de la misma junto al límite con la Comunidad Foral de Navarra.





Se trata de un área de 4 Km² que cubre parte de fondo de valle, por el que pasa la Autovía A-1 (también llamada Autovía del Norte), y el resto son montes. Es un terreno con fuertes pendientes que en algunas zonas alcanzan el 50%, estando la cota de fondo de valle en torno a 430 m. y la más elevada alrededor de 920 m. en el monte Aitxu.

El paisaje está formado por praderas naturales para explotación extensiva de ganado situadas en las zonas con menor pendiente del terreno, y el resto está ocupado por un arbolado de gran porte compuesto por hayas, en su mayor parte, y salpicado con pequeñas repoblaciones de diferentes especies de coníferas.

4.2.- Datos utilizados.

Los datos LiDAR sobre los que se desarrolla este trabajo proceden de los dos únicos vuelos realizados hasta el momento en el País Vasco; los componentes del sistema y las características técnicas de cada uno de ellos se detallan a continuación:

VUELO 2008.

Se realizó entre los días 18 de Junio y 10 de Julio de ese año; el sistema estaba formado por:

- Sistema Lite Mapper 5600 con Laser Scanner RIEGL LMS-Q560
- Sistema de Navegación: CCNS-4 de IGI
- GPS: NovAtel OEM 4-G2 (Internal) 4-G2 L1/L2 2Hz.
- INS: Aerocontrol IID. Frecuencia de registro 256 Hz

Los parámetros de configuración del sensor LiDAR fueron:

- Ángulo de pulso : 60º
- Frecuencia de pulso: 120000 Hz
- Frecuencia de escaneo: 80000 Hz
- Divergencia del haz: 0.5 mrad
- Facetas: 4
- Velocidad de avance: 110 Km/h

Las características de la toma de datos fueron las siguientes:

- Densidad de puntos: Densidad media planificada de 2.5 puntos/ m2.
- Altura de vuelo sobre el terreno: 900 m. con incrementos de variación de 600 m.
- Distancia entre líneas de vuelo: 450 m.
- Recubrimiento transversal: 60 %.

- Corredor de línea de barrido en el terreno: 1039 m.
- Ángulo de barrido: 60º (ANGULO COMPLETO).
- Velocidad de la aeronave: 56.6 m/s
- Gap Límite: 60 m. Es el máximo hueco sin puntos permitido.
- Estaciones de referencia: Se emplearon las integradas dentro de la red GPS del País Vasco y dos estaciones GPS adicionales TRIMBLE 5700 centradas en el área del proyecto con una frecuencia de registro de 2 Hz.

El conjunto de puntos obtenido se dividió según una cuadrícula de 1 Km de lado y se creó un archivo independiente para cada celda.

El procesado de los puntos obtenidos lo realizó la empresa SIGRID, S.L., utilizando los programas de TERRASOLID TerraMatch V-8 y TerraScan V-8. Se obtuvo una nube irregular de puntos con una densidad media de 3.18 puntos/m²; finalmente los puntos quedaron clasificados por categorías.

Con los puntos clasificados como suelo se confeccionó un modelo Digital del Terreno (MDT) de la CAPV con una definición de celda de 1m X 1m de lado.

VUELO 2012.

Los realizó la empresa Azimut, S.A. entre el 7 de Julio y el 28 de Agosto de ese año.

Las características del sensor LiDAR y los equipos auxiliares son las siguientes:

- Sistema de navegación: IGI LM6800i
- Campo de visión transversal: 60º
- Frecuencia de escaneado: 70000 Hz
- Frecuencia de pulso: 100000 Hz
- Densidad promedio: 0.7 puntos/m²
- Número máximo de retornos por pulso: 4

- Mecanismo de compensación de Roll: Automático, ampliando 10º el ángulo de escaneo
- Equipo GPS a bordo del avión: NovAtel OEM4 L12LV 2Hz
- Sistema inercial(IMU/INS):AEROCONTROL IId. Frecuencia de registro 256 Hz

La toma de datos se realizó teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Planificación de vuelo: TopoFlight v7; MDE=IGN; paso de malla= 25 m
- Velocidad del avión: 130 Km/h
- Altura media de vuelo: 1100 m
- Distancia máxima del avión a la estación de referencia: 40 Km
- Estaciones de referencia: GNSS Gobierno Vasco.
- Software utilizado en procesado: GraNav v8.1
- Precisiones obtenidas en procesado: RMSpos<10 cm; RMSori<0,004 roll y pich; <0,01 heading

Los archivos generados a partir de estos vuelos son del tipo *.las* y pueden ser descargados gratuitamente en la página de la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del País Vasco ftp://ftp.geo.euskadi.net/lidar/LIDAR_2008_ETRS89. Para este trabajo hemos descargado los siguientes:

Vuelo 2008 (cada archivo cubre una superficie de 1 Km2):

- 5624757_c_Gipuzkoa.las
- 5624758_c_Gipuzkoa.las
- 5634757_c_Gipuzkoa.las
- 5634758_c_Gipuzkoa.las

Vuelo 2012 (cada archivo cubre una superficie de 4 Km2):

- 562-4758.las

Esta será la información de partida, que corresponde exactamente a la misma zona del terreno, con la que trabajaremos por separado realizando los cálculos que son objeto de este trabajo; los cuatro archivos del vuelo de 2008 los procesaremos un grupo.

5.- Cálculo de modelos digitales y datos estadísticos.

5.1.- Programas utilizados.

El trabajo se centra en el procesado de los archivos de tipo *.las* obtenidos de los vuelos realizados; el programa utilizado va a ser FUSION v3.40 por ser una herramienta intuitiva y eficaz para el cálculo de los diferentes tipos de modelos digitales sobre los que realizaré las valoraciones forestales.

También utilizaré FUGRO HORIZONS. Inc v1.53, que es un visor geoespacial tridimensional, para visualizar e inspeccionar gráficamente los modelos digitales.

Además usaré EXCEL como hoja de cálculo para realizar el análisis estadístico de los datos generados con FUSION que nos permitirán obtener los parámetros forestales que buscamos.

5.2.- Procesado de datos.

Se procesarán paralelamente por separado los datos de los dos vuelos siguiendo los mismos pasos que voy a detallar a continuación.

5.2.1.- Crear de un proyecto FUSION.

Se comienza cargando los archivos con los datos en bruto obtenidos en LiDAR y creando un proyecto:

- Vuelo 2008:

Proyecto FUSION: 2018

Archivos LiDAR: 5624757_c_Gipuzkoa.las

5624758_c_Gipuzkoa.las

5634757_c_Gipuzkoa.las

5634758_c_Gipuzkoa.las

- Vuelo 2012:

Proyecto FUSION: 2012

Archivos LiDAR: 562-4758.las

5.2.2.- Crear y cargar la imagen de referencia.

Una imagen georreferenciada es un requisito fundamental en el programa Fusion ya que proporciona el sistema de coordenadas y la referencia visual para la exploración de los datos LIDAR. Existen varias posibilidades de hacerlo y en este caso lo haré utilizando la opción de la barra de herramientas.

- Vuelo 2008:

Imagen de referencia: 2008imagen_ref.bmp

- Vuelo 2012:

Imagen de referencia: 2012imagen_ref.bmp

5.2.3.- Catálogo de funciones.

Para revisar la información contenida en los archivos *.las* podemos usar la barra de herramientas del programa o, para mayor información, usar las utilidades del comando */catalog.exe* que, mediante MSDOS, puede generar archivos sobre densidad de imágenes de datos, ficheros de índice, intensidad de las imágenes de retorno, una evaluación rápida de la cobertura y la densidad de puntos...

5.2.4.- Cargar datos LiDAR.

Cargamos los datos en bruto (los cuatro archivos *.las* para 2008 y el de 2012) mediante la opción *raw data*, y como ya tenemos cargada la imagen, comenzamos a procesarlos.

5.2.5.- Filtrado de puntos para obtener los datos de tierra desnuda.

Se trata de separar los puntos correspondientes al suelo de los que están por encima de él para poder calcular un modelo digital de tierra desnuda. Ese modelo es importante en sí mismo y también lo es porque servirá como referencia para calcular las alturas sobre el nivel del suelo de los puntos de vegetación. Para el trabajo que estamos haciendo es más importante saber la diferencia de altura de un punto sobre el terreno que sobre el nivel del mar.

El filtrado se lleva a cabo de forma automática mediante la aplicación de un algoritmo. El procedimiento se lleva a cabo en un entorno de MS-DOS con el comando */Groundfilter*; el algoritmo ejecutable se basa en el descrito en

“Determinación de modelos de terreno en las zonas boscosas con los datos del escáner láser desde el aire” de K. Kraus y N. Pfeiffer (1998, ISPRS). Para cada vuelo establezco una ruta batch del ejecutable en MN-DOS que me genera un archivo que contiene solamente los puntos de suelo.

- Vuelo 2008:

Ejecutable MS-DOS: groundfilter_2008TFG

Archivo puntos suelo: 2008_puntosuelo.las

- Vuelo 2012:

Ejecutable MS-DOS: groundfilter_2012TFG

Archivo puntos suelo: 2012_puntosuelo.las

Estos archivos *.las* los podemos visualizar con el programa FUGRO, que nos permite apreciar el modelo digital resultante en 3D dinámico.

5.2.6.- Crear un Modelo Digital de Superficie de Tierra Desnuda.

Utilizando de nuevo MS-DOS pero esta vez con el comando GridSurfaceCreate, calculo el modelo digital del suelo.

- Vuelo 2008:

Ejecutable MS-DOS: GridSurfaCcreate_2008TFG

Modelo Digital de Superficie: 2008_superficie.dtm

- Vuelo 2012:

Ejecutable MS-DOS: GridSurfaCcreate_2012TFG

Modelo Digital de Superficie: 2012_superficie.dtm

Desde la barra Bare Eath puedo entrar a visualizar las curvas de nivel del modelo creado comprobando que no aparecen zonas sin información o con curvas de nivel de formas extrañas. Puedo visualizarlo en 3D haciendo una ventana con el botón izquierdo, ya que me lleva al Lidar Data Viewer, donde puedo apreciar todos los puntos a color según un gradiente de alturas, solo los de superficie o diferentes opciones más.

5.2.7.- Crear un Modelo Digital de Superficie de Vegetación.

El siguiente paso consiste en calcular modelos digitales de la vegetación que cubre el terreno. Voy a calcular dos tipos de modelos:

5.2.7.1.- Canopy Surface Model (CSM): es un modelo de la parte superior de la copa de los árboles; lo calculo ejecutando también en MS-DOS el comando */CanopyModel* que genera el archivo DTM de superficie correspondiente.

- Vuelo 2008:

Ejecutable MS-DOS: CanopyModel_2008_CSM

Modelo Digital de Vegetación: 2008_CSM.dtm

- Vuelo 2012:

Ejecutable MS-DOS: CanopyModel_2012_CSM

Modelo Digital de Vegetación: 2012_CSM.dtm

5.2.7.2.- Canopy High Model (CHM): es un modelo medio de la copa de los árboles; lo calculo ejecutando también en MS-DOS el comando */CanopyModel /ground* que genera el archivo DTM de superficie correspondiente.

- Vuelo 2008:

Ejecutable MS-DOS: CanopyModel_2008_CHM

Modelo Digital de Vegetación: 2008_CHM.dtm

- Vuelo 2012:

Ejecutable MS-DOS: CanopyModel_2012_CSM

Modelo Digital de Vegetación: 2012_CHM.dtm

5.2.8.- Estimación del cálculo de Cobertura de Dosel.

La Cobertura de Dosel es el número que resulta de dividir el N^o de primeros retornos por encima de una altura de rotura entre el N^o de primeros retornos por unidad de superficie, entendiendo como Altura de Rotura una altura determinada

sobre el terreno. Este índice hace una estimación de la continuidad física del dosel vegetal de los árboles.

Para calcularlo se ejecuta en MS-DOS el comando / *Cover* aplicando para este trabajo alturas de rotura de 3 y 15 m.

- Vuelo 2008:

Ejecutable MS-DOS: Cover15_2008TFG; Cover3_2008TFG

Modelo Digital de Vegetación: 2008_Cover15.dtm; 2008_Cover3.dtm

- Vuelo 2012:

Ejecutable MS-DOS: Cover15_2012TFG; Cover3_2012TFG

Modelo Digital de Vegetación: 2012_Cover15.dtm; 2012_Cover3.dtm

5.2.9.- Estimación del cálculo de Densidad de Vegetación.

La Densidad de Vegetación es el número que resulta de dividir el Nº total de retornos entre el Nº total de retornos por unidad de superficie, considerando solamente un estrato de la altura total de la vegetación. Este índice hace una estimación del grado de desarrollo vegetal de la masa forestal por estratos.

Para calcularlo se ejecuta en MS-DOS el comando / *Cover*, pero añadiéndole / all y / upper para definir el estrato sobre el que se realizará el cálculo. En este caso el cálculo se realiza para el estrato comprendido entre 2 y 14 m.

- Vuelo 2008:

Ejecutable MS-DOS: Cover2_14_2008TFG

Modelo Digital de Vegetación: 2008_Cover2_14.dtm

- Vuelo 2012:

Ejecutable MS-DOS: Cover2_14_2012TFG

Modelo Digital de Vegetación: 2012_Cover2_14.dtm

5.2.10.- Extracción de Parámetros Forestales.

También en este caso utilizo el entorno MS-DOS y aplico el comando / *GridMetrics* para conseguir un fichero de salida en forma de base de datos sobre el que se han calculado una serie de estadísticas descriptivas; estos datos corresponden a cada celda individual definida para el archivo de salida (15*15 m. en este caso) añadiendo la herramienta / *outlier: bajo,alto*, con valores 2 y 190 respectivamente, para concretar los cálculos en ese estrato de la masa forestal. Además se establece una altura de rotura de 3 m. Gridmetrics realiza los cálculos utilizando la intensidad o la elevación, nunca las dos a la vez, generando así archivos independientes.

- Vuelo 2008:

Ejecutable MS-DOS: GridMetrics_2008TFG

Base de datos: 2008_parametros_all_returns_elevation_stats.xls

2008_parametros_all_returns_intensity_stats.xls

- Vuelo 2012:

Ejecutable MS-DOS: GridMetrics_2012TFG

Base de datos: 2012_parametros_all_returns_elevation_stats.xls

2012_parametros_all_returns_intensity_stats.xls

6.- Estimación comparativa de parámetros forestales.

En este apartado realizaré un comparativo entre las características más relevantes de los dos vuelos realizados sobre la zona y una estimación de algunos parámetros forestales fundamentales en cada uno de ellos que me permitan valorar la fiabilidad y precisión de los dos proyectos LiDAR.

6.1.-Compendio de datos.

- Vuelo 2008:

Nombre de archivo	Altura mínima	Máximo X	Y Máxima	Altura máxima	Devoluciones totales	Densidad de retorno nominal
d: \\ 2008 \ TFG 5624757_c_Gipuzkoa.las	455.90	562.999,99	4,756,999.99	857.15	5384046	5.38
d: \\ 2008 \ TFG 5624758_c_Gipuzkoa.las	4.25	562.999,99	4,757,999.99	1092.61	5129234	5.13
d: \\ 2008 \ TFG 5634757_c_Gipuzkoa.las	599.51	563.999,99	4,756,999.99	1065.43	4673327	4.67
d: \\ 2008 \ TFG 5634758_c_Gipuzkoa.las	552.58	563.999,99	4,757,999.99	983.97	4960517	4.96
En general (4 archivos)	4.25	563.999,99	4,757,999.99	1092.61	20147124	5.04

- Vuelo 2012:

Nombre de archivo	Altura mínima	Máximo X	Y Máxima	Altura máxima	Devoluciones totales	Densidad de retorno nominal
d: \\ 2012 \ TFG 562-4758.las	403.89	563.999,99	4,757,999.99	1496.76	4484194	1.12

- **Discusión:** Viendo los valores de X e Y se comprueba que en los dos vuelos se ha cubierto exactamente la misma zona. Llama la atención la gran diferencia existente entre el número puntos captados en cada vuelo (devoluciones), que supone una relación de 5:1 a favor del vuelo 2008; este aspecto se hace todavía más evidente si nos fijamos en la densidad resultante, medida en puntos por metro cuadrado.

6.2.- Clasificación de datos.

- Vuelo 2008:

Valor Clase	# devuelve	Interpretación	%
0	5513038	Creado, nunca clasificado	27.36
1	0	Sin clasificar	0.00
2	4133854	Suelo	20.52
3	373484	Vegetación baja	1.85
4	275416	Vegetación Medium	1.37
5	9846818	Vegetación de alta	48.87
6	333	Edificio	0.00
7	723	Low Point (ruido)	0.00
8	0	Modelo Key punto (punto de masa)	0.00
9	0	Agua	0.00
10	0	Reservado	0.00
11	3458	Reservado	0.02
12	0	Puntos Overlap	0.00
13	0	Reservado	0.00
14	0	Reservado	0.00
15	0	Reservado	0.00
16	0	Reservado	0.00
17	0	Reservado	0.00
18	0	Reservado	0.00
19	0	Reservado	0.00
20	0	Reservado	0.00

21	0	Reservado	0.00
22	0	Reservado	0.00
23	0	Reservado	0.00
24	0	Reservado	0.00
25	0	Reservado	0.00
26	0	Reservado	0.00
27	0	Reservado	0.00
28	0	Reservado	0.00
29	0	Reservado	0.00
30	0	Reservado	0.00
31	0	Reservado	0.00
En general (archivos LAS solamente)	20147124		100.00

- Vuelo 2012:

Valor Clase	# devuelve	Interpretación	%
0	0	Creado, nunca clasificado	0.00
1	81173	Sin clasificar	1.81
2	608909	Suelo	13.58
3	232451	Vegetación baja	5.18
4	80854	Vegetación Medium	1.80
5	3474058	Vegetación de alta	77.47
6	524	Edificio	0.01
7	1714	Low Point (ruido)	0.04

8	0	Modelo Key punto (punto de masa)	0.00
9	0	Agua	0.00
10	4511	Reservado	0.10
11	0	Reservado	0.00
12	0	Puntos Overlap	0.00
13	0	Reservado	0.00
14	0	Reservado	0.00
15	0	Reservado	0.00
16	0	Reservado	0.00
17	0	Reservado	0.00
18	0	Reservado	0.00
19	0	Reservado	0.00
20	0	Reservado	0.00
21	0	Reservado	0.00
22	0	Reservado	0.00
23	0	Reservado	0.00
24	0	Reservado	0.00
25	0	Reservado	0.00
26	0	Reservado	0.00
27	0	Reservado	0.00
28	0	Reservado	0.00
29	0	Reservado	0.00
30	0	Reservado	0.00

31	0	Reservado	0.00
En general (archivos LAS solamente)	4484194		100.00

- **Discusión:** Llama la atención la diferencia sobre puntos que no han llegado a clasificarse: en torno al 27 % en el vuelo 2008 frente al 0% en el de 2012. Otra diferencia reseñable aparece entre el porcentaje de puntos que corresponden a vegetación alta: sobre el 48 % en el vuelo 2008 frente al casi 78% en el de 2012. En cuanto a puntos de suelo se observa que el porcentaje es parecido para los dos casos.





6.3.- Primer retorno.

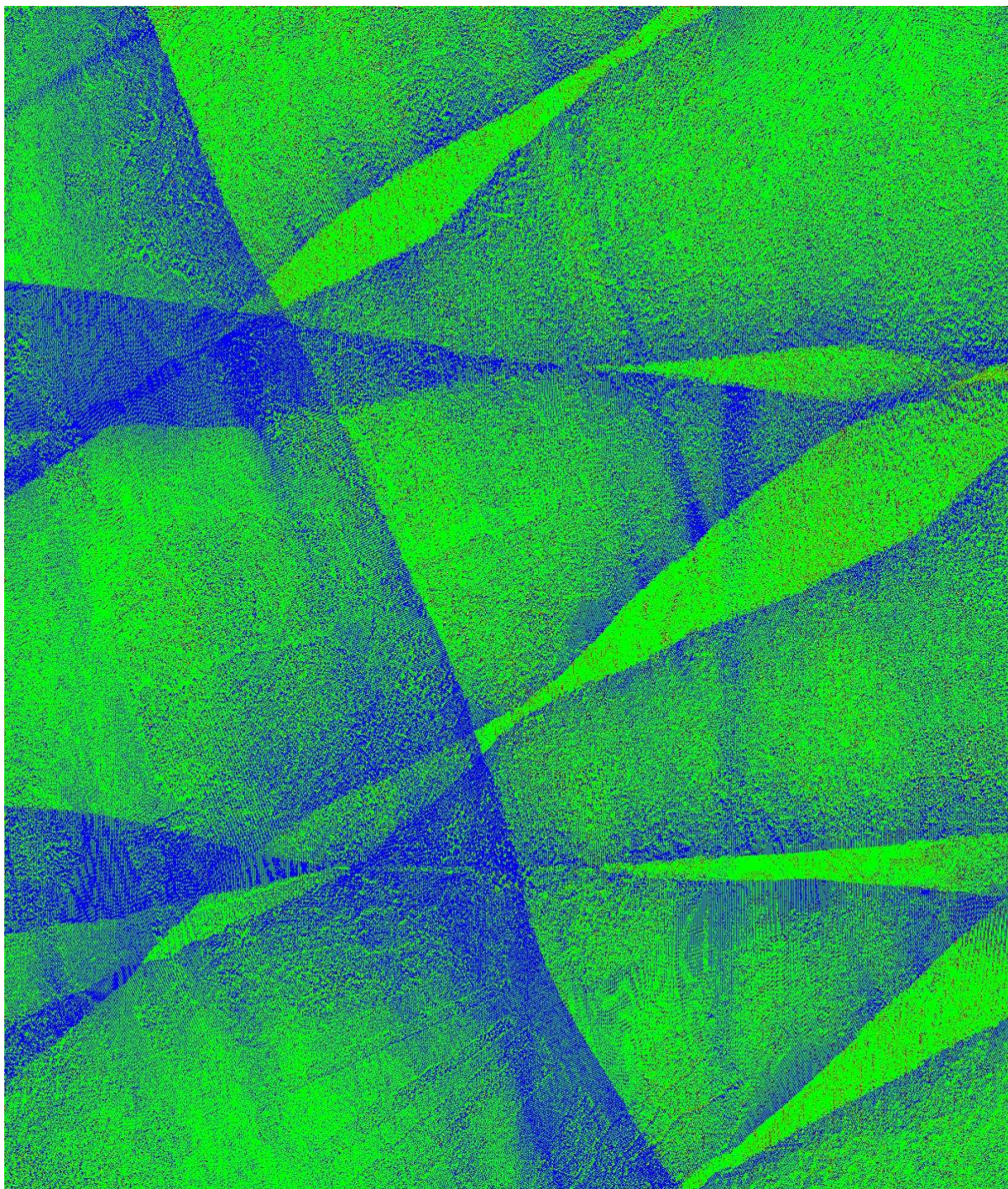
- **Vuelo 2008:**

Densidad calculada utilizando una célula que se 1.41w por 1.41h unidades (2,00 unidades cuadradas)

Primera imagen de densidad de retorno es 1416 filas por 1415 columnas: TFG2008_cat_first_return_density.jpg

Mínimo primera densidad de retorno (rendimientos por unidad de superficie)	0.50
Máximo primera densidad de retorno (rentabilidad por unidad de superficie)	89.50
Promedio de primera densidad de retorno (rentabilidad por unidad de superficie)	3.18
Desviación estándar de primera densidad de retorno (rendimientos por unidad de superficie)	2.77

Color	Descripción	Porcentaje de Area con datos	Porcentaje del Total
	Las células sin puntos (podría ser el área de cobertura exterior)	NA	0.77
	Densidad menos de especificación mínima (menos de 1,00 puntos por unidad de superficie)	3.57	3.54
	Densidad dentro de las especificaciones (1,00 a 3,00 puntos por unidad de superficie)	62.39	61.91
	Densidad supera las especificaciones (más de 3,00 puntos por unidad de superficie)	34.04	33.78



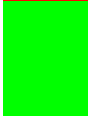



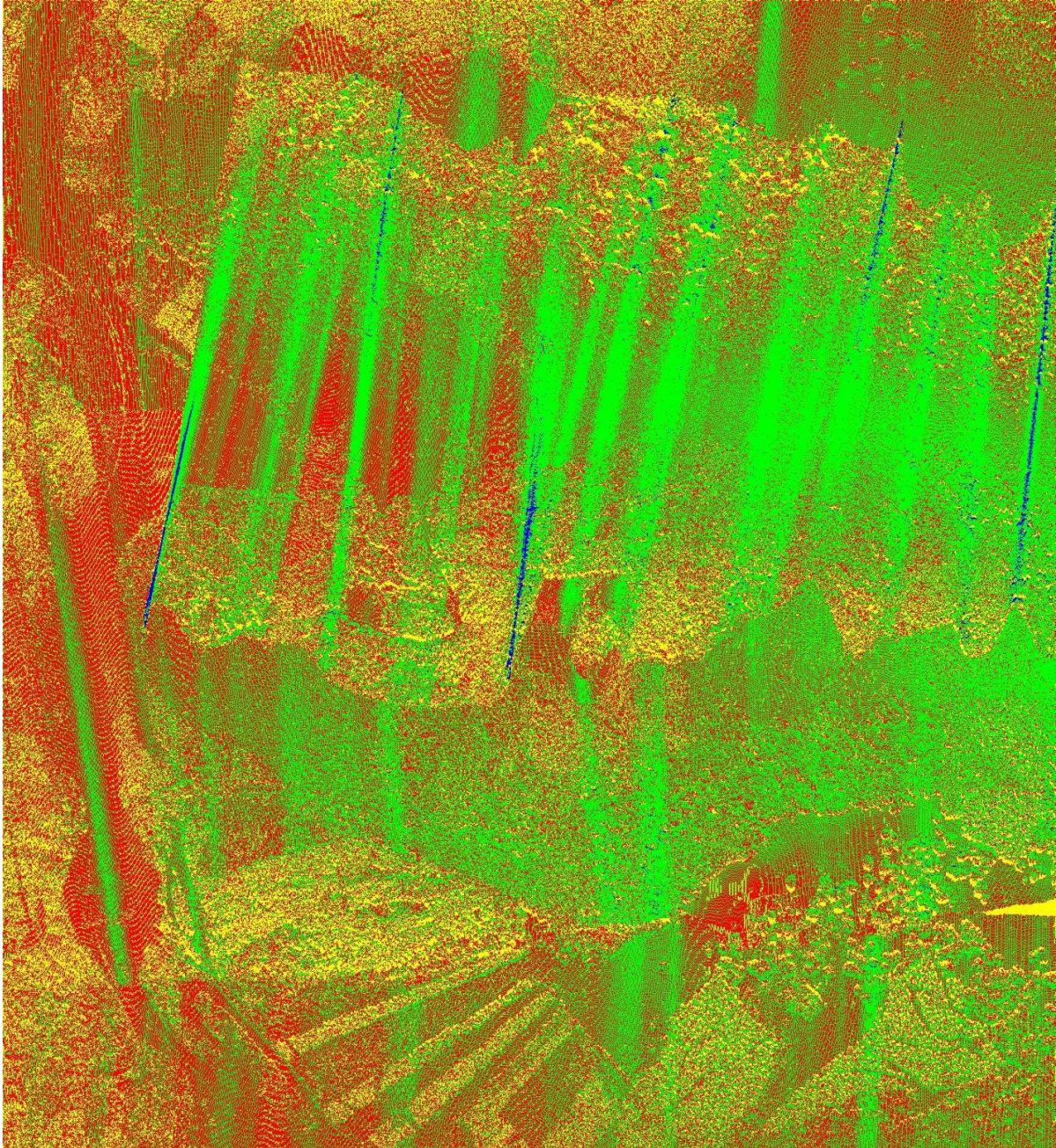
- Vuelo 2012:

Densidad calculada utilizando una célula que se 1.41w por 1.41h unidades (2,00 unidades cuadradas)

Primera imagen de densidad de retorno es 1416 filas por 1415 columnas: TFG2012-cat_first_return_density.jpg

Mínimo primera densidad de retorno (rendimientos por unidad de superficie)	0.50
Máximo primera densidad de retorno (rentabilidad por unidad de superficie)	55.50
Promedio de primera densidad de retorno (rentabilidad por unidad de superficie)	0.95
Desviación estándar de primera densidad de retorno (rendimientos por unidad de superficie)	0.64

Color	Descripción	Porcentaje de Area con datos	Porcentaje del Total
	Las células sin puntos (podría ser el área de cobertura exterior)	NA	14.05
	Densidad menos de especificación mínima (menos de 1,00 puntos por unidad de superficie)	46.04	39.57
	Densidad dentro de las especificaciones (1,00 a 3,00 puntos por unidad de superficie)	53.35	45.86
	Densidad supera las especificaciones (más de 3,00 puntos por unidad de superficie)	0.61	0.52

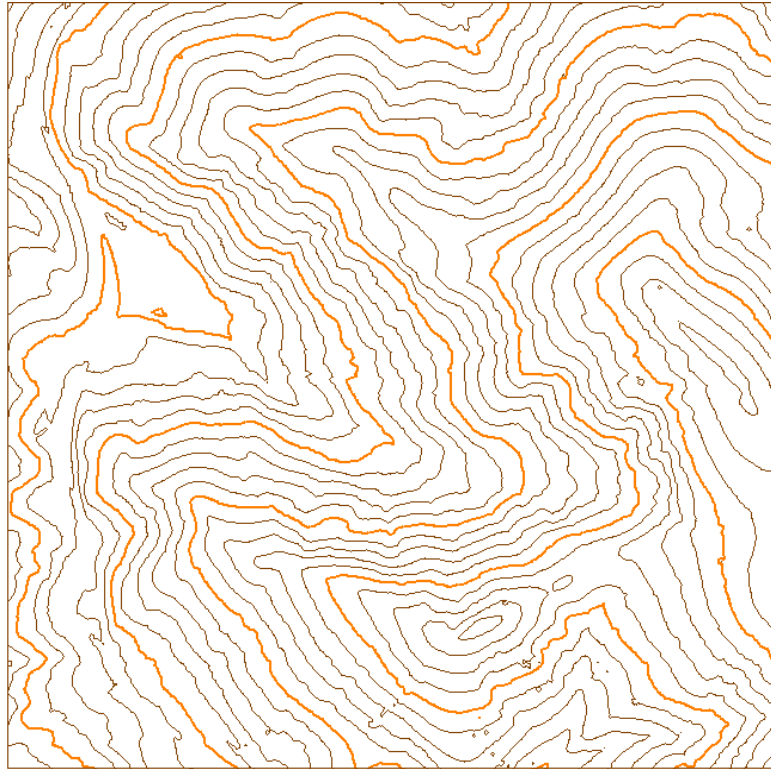


- **Discusión:** Las diferencias en cuanto a densidad de puntos se aprecian con claridad viendo los colores de las fotos: la del vuelo de 2008 indica que no hay zonas con menos de 1 punto/m² y gran parte del terreno tiene más de 3 puntos/m²; en el vuelo de 2012 se ve que hay muchas zonas sin puntos (color amarillo) y también predominan las zonas con menos de 1 punto/m².

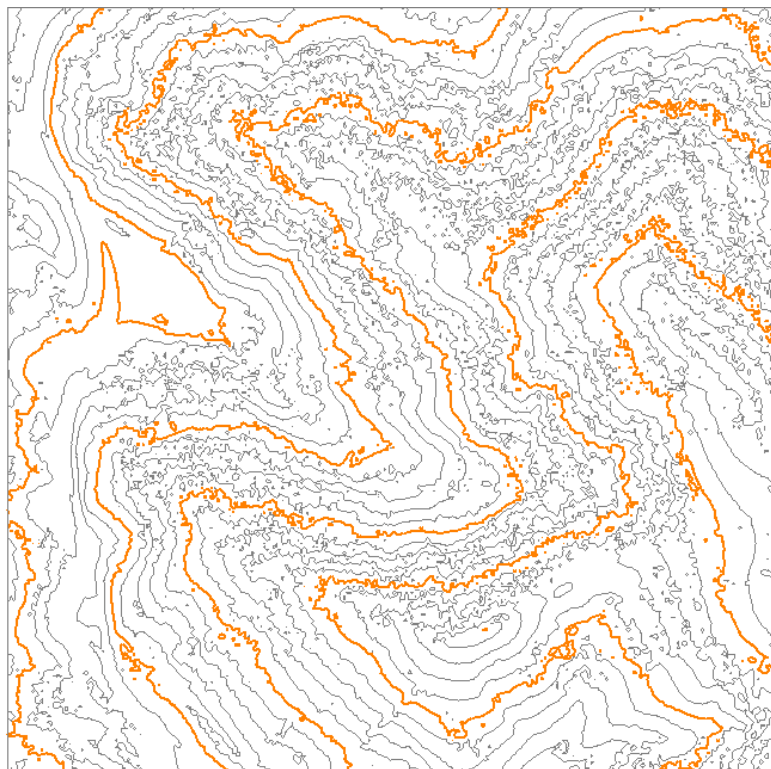
Otro aspecto a tener en cuenta es la diferencia evidente en cuanto al máximo de primera densidad de retorno (rentabilidad por unidad de superficie): frente al casi 90 % del vuelo 2008 se observa un escaso 55% en el de 2012.

6.4.- Modelo Digital de Superficie Desnuda.

- Vuelo 2008:

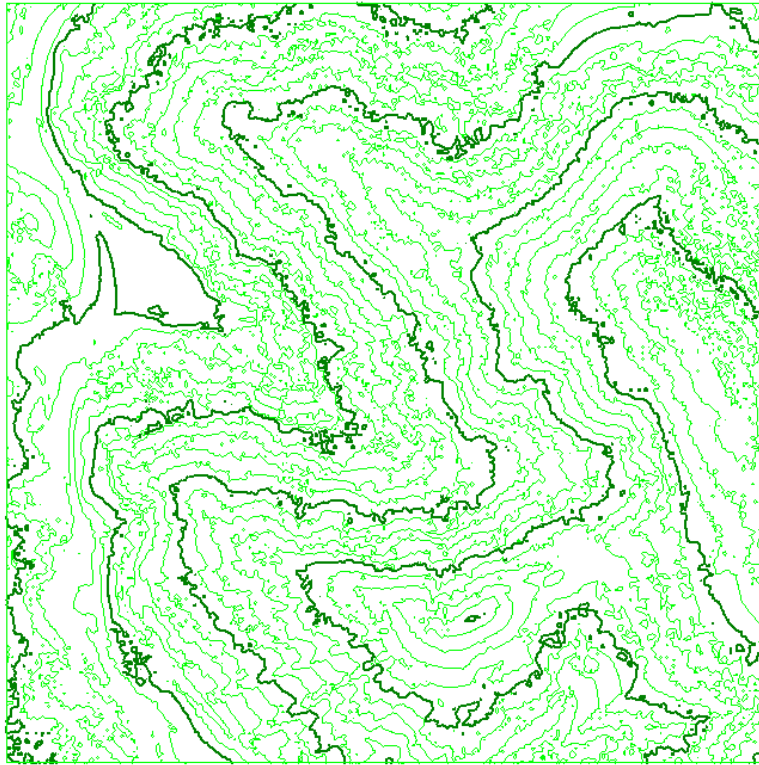


- Vuelo 2012:

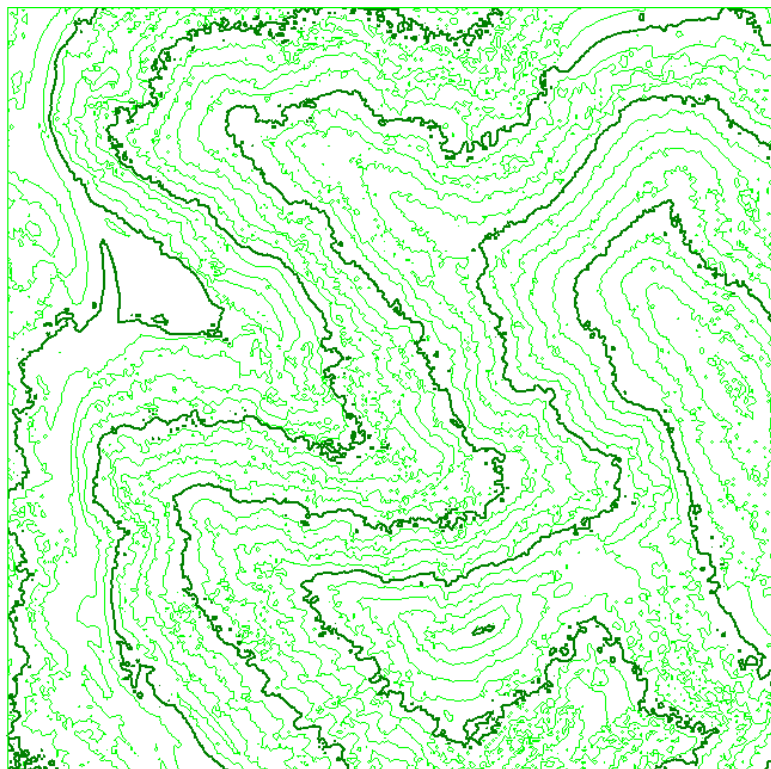


6.5.- Modelo Digital de Superficie de Copa (CSM).

- Vuelo 2008:

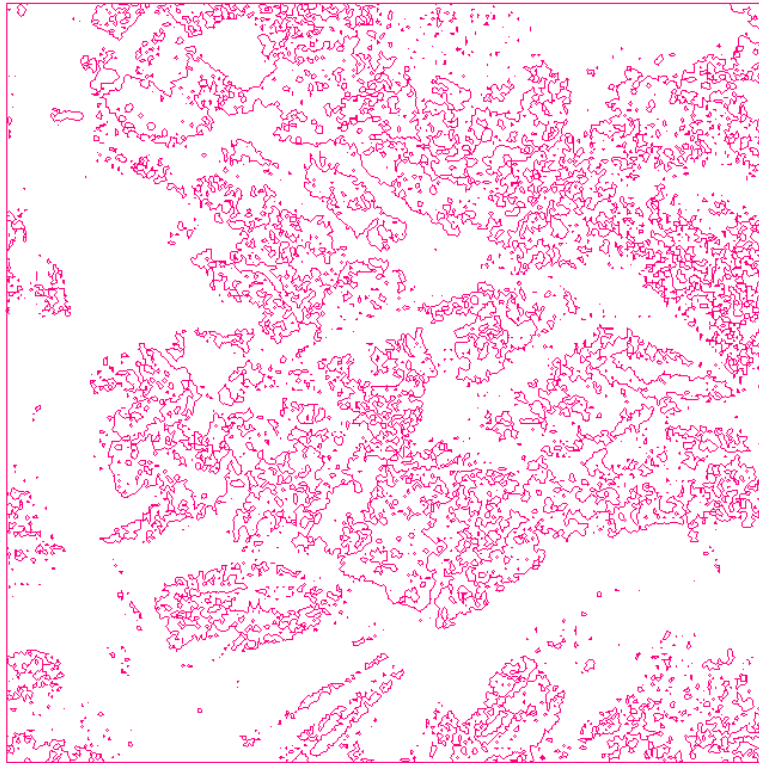


- Vuelo 2012:



6.6.- Modelo Digital de Altura Media de Copa (CHM).

- Vuelo 2008:

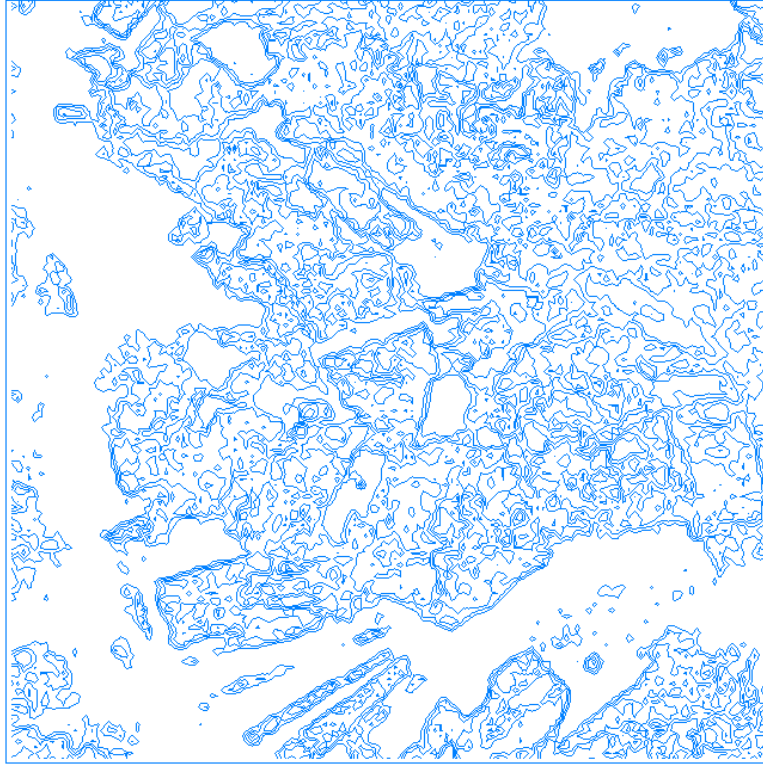


- Vuelo 2012:

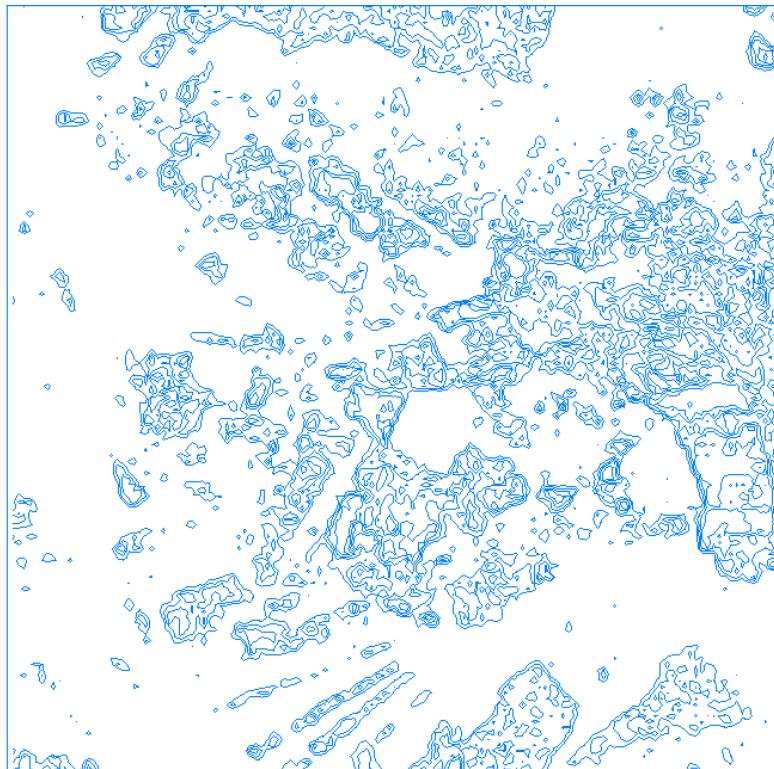


6.7.- Modelo Digital de Cobertura de Dosel.

- Vuelo 2008:

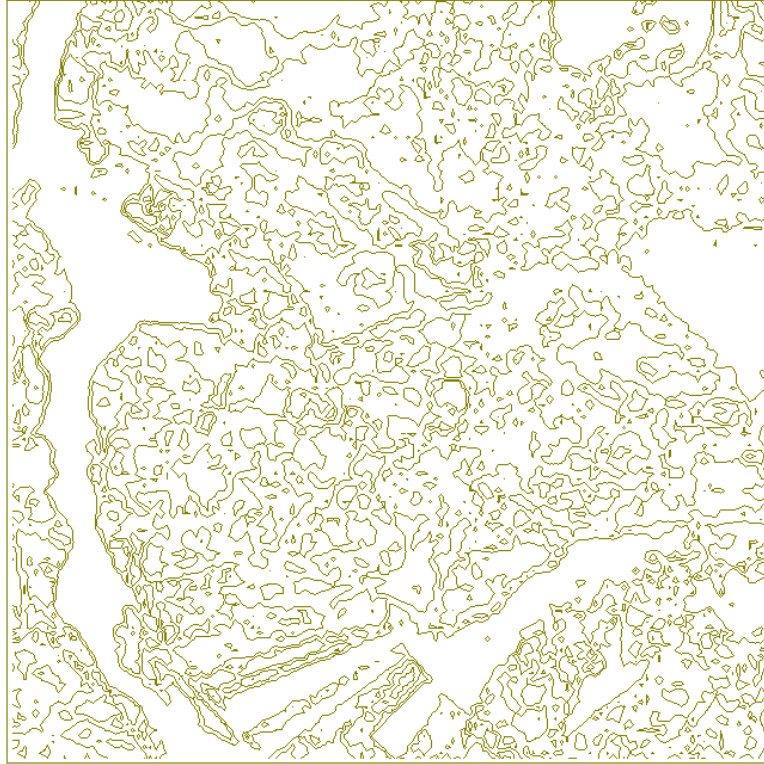


- Vuelo 2012:

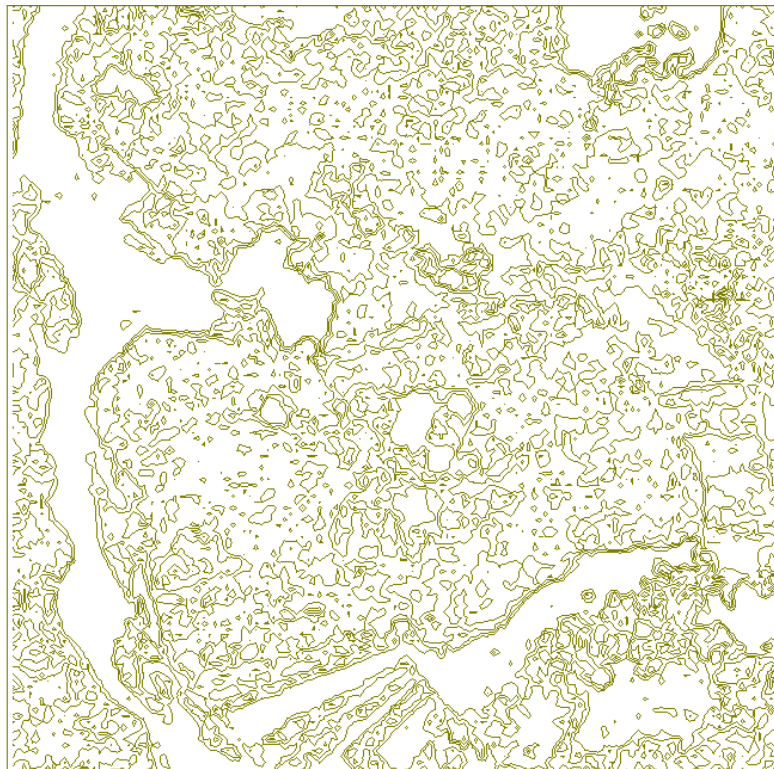


6.8.- Modelo Digital de Densidad de Vegetación.

- Vuelo 2008:



- Vuelo 2012:



7.- Cálculo parámetros forestales.

En este apartado realizaré unos cálculos concretos sobre cuatro parámetros forestales, con los datos de cada vuelo por separado, con la intención de comparar la fidelidad de los datos LiDAR y poder realizar, al mismo tiempo, un seguimiento del desarrollo de la masa forestal que ocupa la superficie de estudio.

Después de analizada la información al respecto, no he encontrado fórmulas de cálculo de parámetros que correspondan concretamente a la especie dominante en la zona de estudio de este trabajo pero he encontrado unos modelos de cálculo que utilizaré porque son aplicables a coníferas, segunda especie en importancia en esta zona, y porque concretan con exactitud en método a utilizar.

Los modelos disponibles en GridMetrics se toman de Andersen et al. (2005), y están calculados para bosques de abetos Douglas en el oeste de Washington (USA); los parámetros estimados son: peso del combustible dosel, densidad aparente, altura de la base y la altura.

Las fórmulas aplicadas son las siguientes:

- PESO COMBUSTIBLE DOSEL (Kg/ha) = $(22.7+2.9*h_{25}-1.7*h_{90}+106.6*D)$
- DENSIDAD MEDIA DOSEL (Kg/m³) = $EXP(-4.3+3.2*h_{cv}+0.02*h_{10}+0.13*h_{25}-0.12*h_{90}+2.4*D)*1.037$
- ALTURA BASE DOSEL (m) = $3.2+19.3*h_{cv}+0.7*h_{25}+2.0*h_{50}-1.8*h_{75}-8.8*D$
- ALTURA DE DOSEL (m) = $2.8+0.25*h_{max}+0.25*h_{25}-1*h_{50}+1.5*h_{75}+3.5*D$

Los datos para calcularlos se sacan de los archivos generados en FUSION para cada vuelo; se trata de:

2008_parametros_all_returns_elevation_stats.xls

2012_parametros_all_returns_elevation_stats.xls.

El cálculo de estos cuatro parámetros se realiza sobre los datos pertenecientes a cada una de las 18265 cuadrículas de 15 X 15 m. en las que se han dividido los 4Km² que mide la zona de estudio. Como se trata de archivos engorrosos y lentos de manejar por tener tanta información, haré un archivo independiente para

comparar mejor los resultados de los dos vuelos; será en el archivo
 Parametros-forestales (comparativo 2008-2012).xls

Analizados los resultados termino por no encontrar una relación directa entre ellos, más aún, llego a la conclusión de que no se pueden tener en cuenta. A continuación aparece una tabla resumiendo los datos obtenidos.

	ALTURA DE DOSEL (m)		ALTURA BASE DOSEL (m)		DENSIDAD DOSEL (Kg/m3)		PESO COMBUSTIBLE DOSEL (Kg/ha)	
	2008	2012	2008	2012	2008	2012	2008	2012
SUMA	682675.89	375310.80	-555639.26	38253.09	66431657.87	6798.11	10157139.67	2504077.96
MEDIA	41.48	22.81	-33.76	2.32	4036.68	0.41	617.19	152.16
DIFERENCIA	-307365.09		593892.36		-66424859.76		-7653061.71	

8.- Conclusiones.

En primer lugar me gustaría valorar positivamente la facilidad de acceso a los datos LiDAR y a la información adicional que he solicitado a través de la página <http://www.geo.euskadi.net/> del Gobierno Vasco; la mayoría de la información se obtiene directamente desde menús sencillos y bien organizados desde los que se pueden realizar las descargas de archivos por lo que puedo decir que es una herramienta muy útil para futuros trabajos de topografía y cartografía.

El manejo de datos LiDAR con el programa FUSION me ha resultado satisfactorio ya que no ocupa mucha memoria y es muy intuitivo en cuanto a las opciones de dibujo y visualización de modelos digitales. Sin embargo, el procesado de datos tales como filtrado de puntos de suelo, navegación por el catálogo de funciones y generación de archivos específicos de los modelos digitales, se realiza en entorno MS-DOS, lo que me ha parecido anticuado y lento ya que no es nada visual ni da otras opciones de configuración; es verdad que, una vez establecidas las rutas de los comandos, el programa ha funcionado correctamente. Para la extracción de parámetros forestales el programa genera unas bases de datos con mucha información con abundantes cálculos estadísticos que, en algunos casos, resultan complicados de analizar con EXCEL, por lo que me parece necesario utilizar programas de cálculo más específicos, sobre todo para el estudio de superficies más grandes.

Las conclusiones a las que llego después de analizar los vuelos 2008 y 2012 en esta zona es que los equipos y la metodología empleados son bastante parecidos excepto en la cantidad de puntos observados y, por consecuencia, en el factor de densidad de puntos; para la misma superficie de terreno, el vuelo de 2008 ha capturado más de 20 millones de puntos, frente a los escasos 4 millones del vuelo 2012, de lo que resultan unas densidades de 5.04 y 1.2 puntos/m², respectivamente. Estos datos nos llevan a descubrir que los modelos digitales obtenidos para cada vuelo son muy diferentes en cuanto a la fidelidad respecto a la realidad del paisaje estudiado: los modelos digitales del 2008 son ondulados y homogéneos en cuanto al trazado de las curvas de nivel que se generan, por lo que se puede deducir que se ajustan mucho al terreno y a la vegetación existentes; sin embargo, los del 2012 son poco detallados, presentan zonas sin información y presentan trazados escabrosos y poco rectilíneos. Esta importante

diferencia en cuanto a la fidelidad con la realidad de los modelos digitales hace que los datos que se podrían obtener de compararlos sean poco creíbles. Parece que sería aconsejable para siguientes vuelos utilizar densidades altas de puntos y lo más parecidas entre sí que sea posible, ya que eso incrementaría en gran medida la información que se podría extraer de ellos.

Resulta interesante comprar el porcentaje de puntos agrupados según la localización de los mismos sobre el terreno y la masa forestal. Me llama la atención que un 27% de los puntos tomados en el vuelo 2008 (más de 5 millones) sean “puntos creados pero no clasificados”, es decir, puntos erróneos, y que en el vuelo 2012 no llegue al 2%; esto lo interpreto como una mejora tal vez evolutiva en el sistema de toma de datos y en los equipos utilizados. Sobre el resto de puntos se observa que en el vuelo de 2012 hay muchos más puntos correspondientes a “vegetación alta” (77%) que en el vuelo de 2008 (48%) y menos correspondientes al “suelo”, 13% frente a 20%, respectivamente. Esto refleja que en 2012 ha habido más dificultad para atravesar la cubierta vegetal y llegar a tomar puntos del suelo, lo cual se puede deber a un mayor y mejor desarrollo vegetativo de los árboles debido a la mayor edad de los árboles y a las condiciones climáticas propias de ese año.

He realizado unos cálculos concretos sobre cuatro parámetros forestales con los datos de cada vuelo por separado con la intención de comparar la fidelidad de los datos LiDAR y poder realizar, al mismo tiempo, un seguimiento del desarrollo de la masa forestal que ocupa la superficie de estudio. Los resultados obtenidos no son aceptables porque no tienen ninguna lógica que permita entenderlos. A pesar de todo, creo que de esto es importante concluir que es necesario calcular fórmulas específicas que se ajusten a la composición y características de la masa forestal de cada zona a estudiar ya que los modelos de cálculo no son extrapolables; de cara a futuros trabajos sería interesante realizar trabajos de campo para establecer fórmulas propias para cada especie y zona geográfica.

9.- Bibliografía.

Estornell, J., Ruiz Fernandez, L. A. (2011). Análisis de los factores que influyen en la precisión de un MDE y estimación de parámetros forestales en zonas arbustivas de montaña mediante datos LiDAR

Estornell, J., Ruiz, L. A. y Velazquez-Marti, B. (2011). Estudio de la cobertura de arbustos y la altura a partir de datos LiDAR en una zona mediterránea

Velázquez-Martí B., Fernández-González, E., Estornell, J. y Ruiz, L. A. (2010). Análisis dendrométricos y dasométrica de la biomasa arbustiva en los bosques mediterráneos.

Estornell, J., Ruiz, L. A., Velazquez-Marti, B. y Hermosilla, T. (2010). Análisis de los factores que afectan la precisión LiDAR DTM en una zona de arbustos empinada.

Estornell, J., Ruiz, L.A., Velázquez-Martí, B., Hermosilla, T. La estimación de la biomasa y el volumen de vegetación arbustiva usando LiDAR y los datos espectrales en un ambiente mediterráneo.

Andersen, H-E., McGaughey, R. J. y Reutebuch, S. E. (2005). Estimating forest canopy fuel parameters using LiDAR data. Remote Sensing of Environment