

RESUMEN

Se ha obtenido un método de estimación de la biomasa rápido, fiable y replicable en cualquier estructura forestal basado en un reducido y sencillo inventario forestal, imágenes de satélite de alta resolución espacial y resolución espectral en los rangos del visible y del infrarrojo cercano y medio y vinculando las variables dependientes e independientes por medio de métodos de regresión por procesos gaussianos.

En el Capítulo 1 se ha realizado un análisis de los métodos utilizados para la estimación de la biomasa. Se ha constatado que no existe un método estandarizado, que la obtención de los datos de campo, la realización de los inventarios y el cálculo de la biomasa como verdad-terreno y variable dependiente no siempre recibe la importancia que necesita y, por tanto, los estudios no siempre son comparables. Además, se han analizado decenas de métodos estadísticos, pero siempre con aplicaciones *ad-hoc*, sin que la replicación sea obvia en cualquier otro ecosistema. Por último, el manejo de imágenes de satélite es muy diverso a pesar de poder contar con una larga serie de imágenes Landsat y con la relativamente reciente adquisición de imágenes Sentinel-2.

Respecto a los datos de campo, en este capítulo se han estudiado los métodos actuales para su obtención. La metodología del Inventario Forestal Nacional de parcelas móviles es de fácil aplicación incluso por personal no familiarizado con los trabajos de campo y sólo es necesaria la medida de alturas y diámetros de los pies en la parcela.

Se ha introducido también el uso de las ecuaciones alométricas de biomasa, que describen la relación del diámetro y de la altura con la biomasa, tanto de cada fracción arbórea como del total de cada pie. El desarrollo de estas ecuaciones para las principales especies forestales arbóreas y arbustivas de España permite determinar con precisión el valor de la biomasa en cada parcela estudiada.

Junto con la definición de parcelas móviles y la aplicación de las ecuaciones de biomasa el operador sólo debe utilizar un sencillo criterio experto relacionado con la estructura general de la parcela inventariada y con el porcentaje de cobertura vegetal, o fracción de cabida cubierta, que permiten clasificar cada una de estas parcelas en grupos de entrenamiento y validación de la regresión homogéneos.

En capítulos posteriores se han estudiado otros métodos de adquisición de datos de campo para confrontarlos con esta metodología, aunque finalmente se ha determinado que la sencillez, rapidez y bajo coste de estos métodos deben ser incorporados a un protocolo único de obtención de la biomasa para que todos los análisis puedan ser homogéneos y comparables.

Finalmente, para conseguir la definición de un método replicable en diversas condiciones y estructuras forestales, se han seleccionado áreas de interés en montes jóvenes y maduros en condiciones de clima mediterráneo *Csa* y *Csb* según la clasificación de Köppen-Geiger. Sobre estas zonas se han experimentado diferentes métodos de estimación de la biomasa.

Siguiendo algunos resultados prometedores de la bibliografía, en el Capítulo 2 se ha experimentado la obtención tanto de los parámetros dendrométricos de los pies

en cada parcela como de los parámetros dasométricos de las parcelas en sí mediante métodos LiDAR. Se han comparado ambas aproximaciones metodológicas con los resultados de un inventario forestal basado en parcelas móviles y ecuaciones alométricas según lo indicado en el Capítulo 1. Tras una larga serie de procesados de las nubes de puntos obtenidas se ha concluido que el uso del LIDAR no genera un método que reduzca el tiempo ni el coste de obtención de la verdad-terreno.

No se ha podido confirmar tampoco que se mejore la precisión del inventario. Además, la estimación de la biomasa se ha mostrado ineficaz en zonas de alta densidad forestal donde la nube de puntos no puede alcanzar la máxima altura en la parcela. El uso de ecuaciones de ajuste basadas en parámetros estadísticos tampoco permite determinar la verdad-terreno.

Con todos estos resultados se obtiene uno de los tres componentes del método propuesto, el cálculo de la biomasa como verdad-terreno utilizando parcelas móviles, inventarios reducidos y ecuaciones alométricas.

En el Capítulo 3 se han estudiado las relaciones estadísticas existentes entre los valores de reflectividad en los rangos del visible, el infrarrojo medio y el infrarrojo medio con la biomasa en montes de masas coetáneas puras en estado de latizal y fustal, considerando esta homogeneidad estructural idónea para un análisis blanco.

A pesar de esta simplificación no se ha podido determinar que exista una relación estadística significativa entre la reflectividad y la biomasa, aunque algunas bandas espectrales, las relacionadas con la humedad, puedan aportar algo de información. Esta conclusión está de acuerdo con buena parte de la bibliografía consultada, a pesar de la cuál la tendencia de los estudios continúa siendo la de intentar asignar pesos definidos a cada variable para generar un algoritmo general de estimación de la biomasa.

En el Capítulo 4 se ha estudiado la relación de las variables biofísicas LAI y FAPAR como descriptoras de la biomasa forestal. Estas variables son consideradas variables climáticas esenciales por lo que su determinación está suficientemente definida por métodos bien validos e incluso se proporcionan como productos derivados de las principales misiones espaciales, como Sentinel-2 con sus productos de segundo nivel L2B. Esto podría ser una ventaja considerando que la estructura de una masa, su edad, o su especie principal tiene que estar relacionada con la superficie foliar y la cantidad de energía que absorbe y por tanto éstas últimas podrían ser usadas como descriptoras de la biomasa.

La obtención de parámetros biofísicos globales de Sentinel-2 está definido por una base teórica en la que la mayor parte de los datos de entrada procede de zonas agrícolas, por lo que se ha decidido primero comprobar si estos productos globales están bien ajustados en las zonas forestales de interés.

Aplicando procedimientos estandarizados por el CEOS-LPV se ha comprobado que los valores bajos de LAI, entre 0 y 1, están sobrestimados en los productos L2B en todo tipo de condiciones, siendo precisamente estos valores los más representativos de un monte mediterráneo típico, por lo que el uso de productos globales L2B de Sentinel-2 podría dar lugar a un error por exceso en la estimación de la biomasa. El descubrimiento de estos resultados han sido un éxito en la investigación que se podría considerar como “éxito colateral” pues no eran el objetivo último del estudio y se presentaron en la reunión del comité de validación de Sentinel-2 en la sede de la ESA.

En todo caso, la determinación precisa de los valores de LAI y FAPAR mediante funciones de transferencia de la radiometría de campo a los valores de reflectividad no ha proporcionado ningún resultado. LAI y FAPAR se calculan como una combinación lineal de entre una y cuatro bandas del espectro del visible y del infrarrojo cercano y medio y según se ha determinado en el Capítulo 3 esta combinación lineal no existe con la biomasa. Se ha comprobado que LAI y FAPAR no guardan ninguna relación estadística significativa.

De esta forma se fija el segundo componente del método propuesto con el necesario uso de las bandas de reflectividad sin poder recurrir a productos biofísicos de segundo nivel derivados de las misiones espaciales.

Finalmente, para sobrepasar los límites del aprendizaje clásico por métodos paramétricos, en el Capítulo 5 se ha ensayado el uso de métodos no paramétricos mediante procesos gaussianos, utilizando el término proceso para referirse a una colección de variables aleatorias que se pueden definir a través de una densidad de probabilidad como una gaussiana. Al existir esta densidad de probabilidad no es necesario ajustar al mismo tiempo un gran número de parámetros, lo que restringe la capacidad de modelar con flexibilidad los coeficientes de las variables.

Este método de aprendizaje automático es capaz de explicar un alto porcentaje de la variabilidad de la biomasa en un monte con distintas clases de estructura por edad siempre que la entrada de datos se halle segmentada, es decir, que se clasifique no sólo por los valores de biomasa sino por las condiciones de cobertura y tipo de formación recogidas en el inventario. Se incluye así este método de aprendizaje como el tercer componente del método propuesto en este documento.

Al haberse validado el método con dos sensores diferentes, en el Capítulo 6 se ha podido aplicar este mismo método en dos fechas separadas seis años para evaluar el crecimiento de las masas forestales según haya mediado un tipo de gestión forestal o su ausencia. Se han podido determinar diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento a pesar de que la distribución de valores de reflectividad para cada fecha no las tiene.

Finalmente, en el Capítulo 7 se ha evaluado la capacidad de este método en áreas donde las diferencias estructurales, de edad y de biomasa no son tan marcadas como en las masas adultas. En un regenerado post-incendio se han podido determinar las zonas de más densidad con el mismo método y sin segmentación de clases.

Este trabajo se ha enfocado en la obtención de un método replicable que pueda ser de fácil aplicación incluso por técnicos sin formación avanzada y con la intención de ser una herramienta cotidiana para la gestión forestal. Para poder ser implementado en condiciones reales de uso por administraciones y empresas se ha utilizado un lenguaje de programación de libre acceso. El programa se ha configurado para que el usuario realice el mínimo procesado posible y se obtengan automáticamente los mapas de biomasa de la zona deseada.

Este documento se redacta para la defensa de la tesis doctoral e incluye todas las investigaciones y justificaciones para la configuración de un método replicable y adaptable para la obtención de la biomasa forestal mediante imágenes de satélite.