

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

DETERMINACIÓN DE ZONAS ADECUADAS PARA LA EXTRACCIÓN DE BIOMASA RESIDUAL FORESTAL EN LA PROVINCIA DE TERUEL MEDIANTE SIG Y TELEDETECCIÓN

ALBERTO GARCÍA-MARTÍN^{1*}, DANIEL GARCÍA GALINDO^{2**}, JESUS PASCUAL^{3**}, JUAN DE LA RIVA^{4*}, FERNANDO PÉREZ-CABELLO^{5*} y RAQUEL MONTORIO^{6*}

* Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Zaragoza. C/ Pedro Cerbuna 12, 50.009, Zaragoza, España

** Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos (CIRCE). Universidad de Zaragoza C/ María de Luna 3, 50.018, Zaragoza, España

¹ algarcia@unizar.es, ² dgarciag@unizar.es, ³ jpascual@unizar.es, ⁴ delariva@unizar.es,
⁵ fcabello@unizar.es, ⁶ montorio@unizar.es

RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología para determinar las zonas de la provincia de Teruel (España) más adecuadas para la extracción de residuos forestales con fines energéticos respetando los principios de sostenibilidad ecológica de los bosques. Para ello, se modelizan mediante teledetección y SIG los cuatro factores territoriales que intervienen en la viabilidad técnica y económica de la extracción de este recurso renovable: la cantidad de biomasa disponible, la pendiente, la superficie de la masa y la distancia a caminos y pistas de desembosque. Con posterioridad, estos cuatro factores se combinan en dos índices cuyo resultado sintetiza la aptitud de cada punto del territorio con una resolución espacial de 25 m, identificándose las zonas más adecuadas en la provincia. De los dos índices desarrollados, el que se basa en la suma ponderada de las variables resulta el más adecuado, ya que es más sencillo y permite considerar mejor los criterios técnicos de los gestores.

Palabras clave: residuos forestales, energía renovable, imágenes de satélite, SIG, Teruel.

DETERMINATION OF SUITABLE AREAS TO HARVEST FOREST RESIDUAL BIOMASS IN TERUEL PROVINCE USING GIS AND REMOTE SENSING

ABSTRACT

This work shows a methodology to determine the areas in Teruel province (Spain) more suitable to harvest forest residues for energy production taking into account the forest sustainable ecological principles. To this, the four spatial factors that influence the technical and economic feasibility to harvest this renewable resource are modeled using Remote Sensing and GIS techniques: the quantity, the slope, the area of forest stands and the distance to forest tracks. After

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

that, these four factors are used in two indices whose result synthesized the suitability of each stand with a spatial resolution of 25 m, allowing to identify the more adequate areas in the study area. The index which allows the weighted factors addition results the most suitable owing to its simplicity and its usefulness to take into account the managers criteria.

Keywords: forest residues, renewable energy, remote-sensing images, GIS, Teruel.

1. Introducción

Los residuos forestales generados en las operaciones selvícolas de limpieza, poda y cortas parciales o finales de los montes pueden ser utilizados como combustibles orgánicos en aplicaciones eléctricas, térmicas y/o de co-combustión (IDAE, 2007). Este tipo de aprovechamiento de unos materiales que generalmente quedan acumulados en el bosque o que son quemados de forma controlada *in situ* reporta tanto beneficios socio-económicos como medioambientales (Velázquez, 2006). Dentro de los primeros, el uso de este recurso renovable endógeno contribuye a reducir la dependencia energética del petróleo existente en España en un contexto en el que las previsiones a medio-largo plazo una vez se inicie la recuperación económica indican un progresivo aumento de la demanda energética y un encarecimiento del precio de este combustible fósil (Lorente, 2009; Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2010a). En un ámbito más local, la utilización de estos materiales, con un valor de mercado en principio nulo, permite la aparición de empresas dedicadas a su logística y a su utilización, lo que puede contribuir a la diversificación de la actividad económica en el ámbito rural y al desarrollo de infraestructuras, pudiéndose extender estos efectos locales a una escala regional (Domínguez, 2002; IDAE, 2005). En cuanto a los beneficios medioambientales, éstos se producen tanto en la fase de producción-recolección, dado que su retirada hace disminuir el riesgo de incendio forestal y su severidad (IDAE, 2005; Velázquez, 2006) y que la realización de trabajos selvícolas conducentes a su obtención permite mejorar el estado de las masas forestales (Eriksson *et al.*, 2002; Raison, 2002), como es su fase de transformación energética, ya que su combustión tiene un papel prácticamente neutro en el ciclo de CO₂ y presenta una emisiones muy bajas de azufre y cloro (Hakkila y Parikka, 2002; IDAE, 2005).

El empleo energético de los residuos forestales, al igual que el resto de recursos proveedores de biomasa, presenta la ventaja de su disponibilidad constante frente a otras renovables de carácter más variable como la eólica o la hidroeléctrica, ya que la biomasa conserva su energía hasta el momento de su utilización. Esta propiedad hace que la biomasa sea la energía renovable más fácil de gestionar, permitiendo crear un stock energético para los momentos en que las otras fuentes, renovables o no, no se encuentren disponibles (Jarabo, 1999; Lorente, 2009). Por el contrario, uno de sus principales inconvenientes frente a otras energías de este grupo, que limita su desarrollo y utilización, es su escasa concentración espacial, su ubicación en terrenos de difícil accesibilidad y el desconocimiento de la cantidad de biomasa residual de una masa forestal (IDAE, 2005; IDAE, 2007). Así, el conocimiento de la disponibilidad de este recurso resulta prioritario de cara a conocer la viabilidad de proyectos que los pretendan utilizar (IDAE, 2005; IDAE, 2007; Esteban *et al.*, 2008). Esta cuestión es relevante en un momento en el que el nuevo Plan de Energías Renovables 2011-2020 (en redacción), recogiendo lo dispuesto en la Directiva 2009/28/CE, marca

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

como objetivo que el 20% del consumo de energía final en España en 2020 proceda de energías renovables, el doble de lo marcado en el anterior Plan para el año 2010 (Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2010b).

Gracias a la correlación que existe entre los parámetros forestales que definen a un árbol (diámetro del tronco, altura...) y a una masa (densidad de copas, volumen total, etc.) con la información radiométrica contenida en las imágenes de satélite y a las características de éstas, la teledetección se ha convertido en una herramienta adecuada para la realización de tareas de inventario forestal y para la estimación de la biomasa (Tomppo *et al.*, 2008; Powell, 2010). La obtención de información en las imágenes de satélite de forma continua permite reducir gran parte del trabajo necesario en inventarios tradicionales de muestreo de parcelas de campo, eliminado además, las imprecisiones debidas a asociar un determinado valor a zonas para las que no se tiene información directa a partir del uso de interpolaciones obtenidas con un conjunto más o menos importante de esas parcelas (Salvador y Pons, 1998; Hyyppä e Hyyppä, 2001; Franklin, 2001). No obstante, las aplicaciones desarrolladas en el seno de la teledetección para estimar biomasa presentan un carácter muy local, no siendo enteramente reproducibles a escalas regionales (Muukkonen y Heiskanen, 2005), localizándose los mayores problemas en medios forestales heterogéneos como los tropicales y mediterráneos (Lu, 2006). Este aspecto ha sido confirmado en trabajos previos dedicados a la estimación de residuos forestales en medios mediterráneos mediante el uso de imágenes Landsat, si bien fue posible cartografiar de forma consistente la zonas más ricas en este recurso (García-Martín *et al.*, 2006; 2007).

Sin embargo, debido su elevada dispersión territorial y a su escasa densidad energética, el conocimiento de la cantidad potencial de residuos forestales existente en el territorio no es el único limitante de cara a determinar la viabilidad de utilización de este recurso en aplicaciones energéticas (Domínguez, 2002; Velázquez, 2006). Así, otros factores destacados de índole espacial que también inciden de forma decisiva en su aprovechamiento, por cuanto determinan el coste de la extracción del recurso, son: (i) la pendiente, que controla la posibilidad de utilizar maquinaria y su rendimiento (Álvarez, 2004; Esteban *et al.*, 2004); (ii) la extensión de la masa forestal, que establece la necesidad de desplazamientos entre cuarteles forestales en la jornada laboral (Asikainen *et al.*, 2002); y (iii) la distancia a pistas, caminos y carreteras utilizados para su evacuación y transporte desde la zona de extracción, que determina parte de los costes de transporte (Álvarez, 2004; Esteban *et al.*, 2004). Estos tres factores son fácilmente modelizables en un SIG, adoptando para cada punto del territorio valores de aptitud recogidos en la bibliografía específica en relación con la viabilidad económica y técnica de la extracción de la biomasa residual. Una vez modelizados, estos tres factores se pueden integrar junto al factor cantidad de biomasa residual para desarrollar un único índice que los integre, determinando así las zonas de aprovechamiento óptimas, es decir, las que presentan mayor viabilidad desde el punto de vista económico y técnico.

2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para determinar mediante el uso de imágenes de satélite y SIG las zonas de la provincia de Teruel que presentan una mayor aptitud

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

para el aprovechamiento de su biomasa residual forestal, teniendo en cuenta las características de las masas forestales (cantidad de biomasa residual y superficie de la masa), las características orográficas del terreno (pendiente) y la existencia de las infraestructuras necesarias para el desembosque de estos materiales en términos de cercanía a pistas y caminos.

3. Área de estudio

El área de estudio – la provincia de Teruel ([figura 1](#)) – fue la seleccionada en el proyecto LIGNOSTRUM (CICyT AGL2002-03917-AGR-FOR), en el que se insertó el presente trabajo de investigación. El objetivo de este proyecto era conseguir un incremento de la utilización de los residuos agrícolas y forestales como recurso energético. En este contexto, la provincia de Teruel se configuraba, a priori, en un escenario ideal dado que, por un lado, esta provincia presenta una importante superficie agrícola y forestal y, por otro, en ella existen amplios espacios rurales tradicionales con importantes problemas socioeconómicos debido a la escasez de actividades industriales e iniciativas y al despoblamiento y el envejecimiento de la población (Guillén y Lozano, 2005; IAEST, 2010).

Las características de esta provincia que presentan una importante influencia en el cumplimiento del objetivo planteado, sobre todo en la parte de estimación del recurso, son su elevada extensión (14.804 km²), la concentración de los recursos forestales en las zonas de montaña (principalmente en las sierras de Albarracín, Gúdar, Javalambre, Cucalón y Puertos de Beceite) y el carácter mediterráneo de sus bosques (presencia de múltiples especies y con una estructura espacial compleja, fruto de las variadas y complejas interrelaciones de los diferentes aspectos ecogeográficos y de la acción antrópica a lo largo del tiempo). Estas tres particularidades determinan el tipo de imagen a utilizar, los tratamientos a aplicar sobre ella y el método de extracción de la información radiométrica (García-Martín *et al.*, 2006; 2007).

De entre todos los tipos de bosque de la provincia, se seleccionaron como objeto de estudio los pinares compuestos por *Pinus sylvestris*, *P. halepensis*, *P. nigra* y/o *P. pinaster*, dado que la suma de éstos representaba el 71% del total de su superficie forestal y, además, la mayor parte de las actuaciones selvícolas y de aprovechamiento tienen lugar en estos bosques (Ministerio de Medio Ambiente, 1996), por lo que eran los que presentan el mayor potencial para la generación de residuos aprovechables.

4. Metodología y materiales

La metodología aplicada en este trabajo se divide en dos etapas. La primera de ellas consiste en obtener y reclasificar cada uno de los cuatro factores territoriales que controlan la aptitud de una zona para ser explotada en función de criterios recogidos en la bibliografía. En la segunda, estos cuatro factores son utilizados para crear dos índices de aptitud espacial que sintetizan en un solo valor la viabilidad técnico-económica de extraer la biomasa residual forestal presente en el territorio.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

4.1. Modelización de los factores parciales

4.1.1. Factor cantidad de biomasa residual forestal (F_{BRF})

La estimación de la biomasa residual forestal (acículas, ramas y parte superior del tallo no comercializable) del área de estudio se basó en los resultados previos, obtenidos al relacionar los datos de esta fracción de biomasa (t/ha en seco) calculados en las parcelas del Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN-2), mediante la aplicación ecuaciones alométricas creadas mediante trabajo de campo, con una imagen Landsat TM del 29 de junio de 1994 (*track* 199, *frame* 32), coetánea a los trabajos de campo del Inventario. El primero de estos trabajos (García-Martín *et al.*, 2006) mostró la existencia de correlaciones significativas entre ambos tipos de datos con toda la muestra poblacional disponible (482 parcelas), siendo mejores las obtenidas con las variables radiométricas originales y las derivadas a partir de éstas que estaban relacionadas con el contenido de humedad. Este grado de relación alcanzado fue adecuado para cartografiar mediante el uso de regresión logística las zonas más ricas de este recurso, aunque insuficiente para ajustar modelos de regresión lineal para cuantificar la cantidad existente debido a la heterogeneidad de los bosques mediterráneos. Esta heterogeneidad fue modelizada en el segundo trabajo (García-Martín *et al.*, 2007) mediante cálculo del Coeficiente de Variación de Pearson (CV), que determinó el grado de heterogeneidad espacial de cada parcela, sirviendo además para crear distintos grupos de parcelas en función de esa característica. Los resultados obtenidos indicaron que los mejores ajustes se alcanzaban con los grupos que contenían un menor número de parcelas y más homogéneas, siendo los coeficientes de correlación alcanzados suficientes para ajustar modelos operativos precisos, si bien es necesario garantizar el máximo número de parcelas posible para asegurar que los datos no están sobreajustados a la muestra y que son representativos de toda el área de estudio. Otro hecho destacable es la alta auto-correlación existente entre las variables radiométricas, lo que impide la utilización de más de una en el ajuste de modelos estimativos.

Así, para ajustar el modelo de regresión lineal que permite conocer la cantidad de residuos, se seleccionó el grupo de parcelas que contenía un mayor número de éstas y que, a su vez, permitía ajustar modelos con un alto coeficiente de determinación ajustado (R^2_a). Esta muestra de parcelas, compuesta por un total de 65, se dividió en dos de forma aleatoria, siendo el 80% utilizado para el ajuste del modelo y el 20% para validarlo. Esta división se hizo de forma aleatoria para que no afectara a ambos procesos. Además, para evaluar la robustez del modelo, la división de la muestra se realizó en cinco ocasiones, calculándose un modelo y su respectiva validación en cada una de ellas. El método de ajuste aplicado fue el de pasos hacia adelante, incluyéndose solamente las variables con significación estadística ($p < 0,05$) y verificándose el cumplimiento de los supuestos básicos de este tipo de regresión tanto a nivel de variable como de modelo. Para valorar la exactitud de los modelos ajustados se utilizó el R^2_a y para la validación se emplearon los estadísticos error cuadrático medio (RMSE) y RMSE relativo (RMSE_r).

Debido a la alta auto-correlación entre las variables radiométricas predictoras anteriormente comentada, los modelos ajustados sólo incluyeron una variable, estando ésta relacionada en todos

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

los casos con el contenido de agua de la vegetación y transformada para cumplir con el supuesto básico de linealidad ([tabla 1](#)). Todos los modelos alcanzaron R^2_a por encima de 0,7, siendo los más elevados los obtenidos cuando la variable seleccionada fue la banda original TM5. Sin embargo, los resultados obtenidos con la muestra reservada del 20% señalaron al modelo ajustado con la variable MID57 (TM5+TM7) como el más adecuado, dado que presentaba el $RMSE_r$ menor (26,67%). De esta manera, teniendo en cuenta la escasa diferencia entre los modelos en cuanto a R^2_a , el modelo obtenido con MID57 se erigió como el más adecuado para derivar cartografía de estimación de la variable estudiada.

Finalmente, para obtener la cantidad de biomasa residual en la provincia de Teruel en la actualidad, la ecuación seleccionada fue aplicada sobre una imagen Landsat TM más reciente análoga a la utilizada para ajustar el modelo (*track* 199, *frame* 32). Así, de las imágenes registradas por TM en fechas recientes, se seleccionó entre las escenas libres de nubes la más cercana en cuanto al momento del año para que las condiciones de iluminación y del estado fenológico de la vegetación fueran similares a la utilizada para generar el modelo. Estos criterios se cumplieron en una escena registrada el 5 de julio de 2008 que cubría la práctica totalidad de la provincia de Teruel, dejando sólo fuera el sector más nororiental, poco importante para este trabajo debido a su escasa cubierta forestal. Sobre esta imagen se aplicaron los mismos pre-tratamientos que se habían empleado sobre la de 1994 al objeto de garantizar su consistencia geométrica y radiométrica. Una vez aplicada la ecuación de estimación, la cartografía resultante, expresada en t ha⁻¹, fue multiplicada por 0,0625 al objeto de calcular el contenido real de biomasa residual en cada uno de los píxeles de 25x25 m (0,0625 ha) de la imagen. Finalmente sobre ésta se aplicó una máscara forestal procedente de Mapa Forestal de Aragón 1:50.000 (MFA). El resultado puede observarse en la [figura 2](#).

La cantidad de biomasa residual potencialmente aprovechable presenta una relación directa con la aptitud de la masa forestal para su extracción ya que, siempre que el resto de los factores contemplados se mantengan constantes, a mayor cantidad el coste de extracción es menor y, por tanto, mayor es la rentabilidad.

No es fácil encontrar en la bibliografía un valor determinado de cantidad de biomasa residual forestal a partir del cual determinar si la extracción del recurso en una determinada área es rentable. Así, por ejemplo, Esteban *et al.* (2004) aplican una función para corregir el coste de la extracción en relación con la biomasa existente, considerando como valor óptimo 7 t ha⁻¹. Asikainen *et al.* (2002), al analizar las condiciones del monte como factores de coste, citan como factor normalizador una cantidad de metros cúbicos de residuo por cada 100 metros de calle de tractor de arrastre (skidder) que equivale a unas 6-10 t ha⁻¹. Por último, Álvarez (2004) establece que el menor coste para cada tipo de tratamiento necesario para el uso energético de la biomasa se da cuando la cantidad de biomasa verde es mayor de 35 t ha⁻¹, lo que, suponiendo un contenido de agua del 50%, equivale a 17,5 t ha⁻¹ de biomasa seca. En definitiva, a la vista de las referencias consultadas, no existe consenso a la hora de determinar el valor óptimo mínimo a partir del cual es rentable la extracción de biomasa, estando éste comprendido en un amplio rango que oscila de las 6 t ha⁻¹ hasta las 17,5 t ha⁻¹.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

Por otro lado, es necesario señalar que la gestión forestal sostenible de las masas forestales requiere que se mantengan determinados umbrales de fertilidad que se relacionan con el contenido de materia orgánica y el nivel de pH de los suelos, estando estas dos cuestiones ligadas a la fracción de biomasa de los árboles que se desprende de éstos y pasa a formar parte de humus y, más tarde, del horizonte orgánico del suelo. Por ello, no toda la biomasa residual existente en la masa forestal puede ser extraída, siendo necesario mantener determinados aportes al suelo para garantizar la sostenibilidad de los bosques intervenidos (Raison, 2002). En la búsqueda bibliográfica efectuada, sólo se encontró un trabajo sobre evaluación del recurso de la biomasa forestal en el cual se citaba una cifra precisa sobre la cantidad de biomasa residual que debía permanecer en el bosque para evitar estos problemas, situándose esta cifra en las 11 t ha⁻¹ (McNeil Technologies, 2003).

Un último factor que se debe tener en cuenta a la hora de establecer el índice parcial relacionado con la cantidad de biomasa óptima para garantizar la rentabilidad económica y ecológica de su extracción es la eficiencia de la maquinaria empleada. De acuerdo con los trabajos de Hakkila (2003) y Ranta (2005), los sistemas de recogida tienen siempre una eficiencia inferior al 100%, incluso en las condiciones más favorables, llegando a alcanzar en estas situaciones una eficacia del 70%.

En función de los tres factores señalados se decidió considerar como óptimas aquellas masas forestales con un contenido en biomasa ≥ 37 t ha⁻¹, dado que, aun suponiendo el máximo de eficiencia de recogida de la maquinaria (70%), queda siempre garantizada la cantidad mínima de residuo necesario para asegurar el aporte de nutrientes del suelo (11,1 t ha⁻¹), siendo la cantidad neta de residuos obtenida de 25,9 t ha⁻¹, cifra ésta muy superior al valor óptimo mínimo contemplado en los trabajos de Asikainen *et al.* (2002), Esteban *et al.* (2004) y Álvarez (2004), a partir del cual es rentable la extracción de biomasa: entre 6 y 17,5 t ha⁻¹.

Establecido el valor óptimo mínimo y teniendo en cuenta que a menor cantidad de este valor debe disminuir el índice parcial en función de la cantidad de biomasa (F_{BRF}), solamente resta establecer la función que controle este índice. Esta función tiene que cumplir la siguiente condición: un valor constante y máximo para cantidades ≥ 37 t ha⁻¹ y decreciente para valores menores. En este contexto se optó por asignar el valor 100 a cantidades ≥ 37 t ha⁻¹, mientras que para cantidades inferiores se utiliza una función decreciente directamente proporcional. Esta clasificación se hizo en intervalos regulares, con la excepción del segundo y el último, asignando como valor de F_{BRF} el promedio de cada intervalo ([tabla 2](#)). Dado que la cartografía de biomasa residual forestal utilizada para inventariar este recurso en la provincia de Teruel no está expresada en t ha⁻¹ sino en toneladas por cada 0,0625 ha (el área de cada píxel), es necesario transformar este valor para poder aplicarlo a nuestra cartografía. Esto se hace multiplicando el valor de t ha⁻¹ por 0,0625 ([tabla 3](#)).

La cartografía de este factor F_{BRF} se elabora reclasificando la de la biomasa residual ([figura 2](#)) con los intervalos de la [tabla 3](#), obteniéndose así una nueva capa raster en la que cada píxel de 25x25 m representa el valor de idoneidad en función de la cantidad de biomasa residual contenida ([figura 3](#)). Para facilitar su comparación con la cartografía obtenida con el resto de factores considerados y con los índices que los combinan, se utiliza una leyenda común en todas ellas de intervalos continuos.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

4.1.2. Factor pendiente (F_{pend})

El factor pendiente juega un papel importante a la hora de determinar la viabilidad de extraer la biomasa residual de una zona, ya que incide directamente en la maquinaria necesaria y, por lo tanto, en los costes. La maquinaria utilizada en estos trabajos forestales puede operar hasta determinados valores máximos de pendiente, de manera que el terreno susceptible de ser explotado puede clasificarse de acuerdo a estos valores.

Los trabajos consultados difieren a la hora de establecer estos umbrales. Así, en el documento elaborado por McNeil Technologies (2003) se considera que no se debe contabilizar la biomasa residual situada en zonas con pendientes $>30\%$, mientras que en Álvarez (2004) las zonas no contempladas son aquellas que presentan pendientes $>50\%$. Garañeda y Bengoa (2005) precisan más acerca de la incidencia de la pendiente en la extracción de la biomasa, estableciendo unos intervalos de eficiencia de recogida: eficiencia del 80% en zonas con pendientes $<10\%$, del 70% en zonas con pendientes comprendidas entre el 10 y el 30% , del 20% para pendientes del 30 al 50% y nula para zonas con pendientes $>50\%$.

Para establecer los valores del factor F_{pend} se tuvieron en cuenta los intervalos de pendiente del terreno-eficiencia de extracción de recurso estimados por Garañeda y Bengoa (2005) para Castilla y León, pero con un carácter más restrictivo. Para zonas con pendientes $<10\%$ se considera que la eficiencia máxima es del 70% , respetándose así el máximo de eficiencia de la maquinaria establecido en los trabajos de Hakkila (2003) y Ranta (2005); dado que ésta es la situación óptima, siguiendo con el procedimiento del anterior factor parcial, el valor del factor F_{pend} que le corresponde es 100 . A partir del anterior valor se asignan de forma proporcional decreciente los restantes a intervalos de pendiente menores que los de Garañeda y Bengoa (2005), considerándose nula la cantidad de biomasa residual que se puede extraer en zonas con pendientes $>35\%$, no sólo por la pérdida de eficiencia en la recogida de la maquinaria, sino también por criterios medioambientales, ya que se considera que por encima de esta inclinación el riesgo de generar erosión durante los trabajos es muy alto ([tabla 4](#)).

Para obtener la cartografía de este factor se utilizó un MDE raster de 25 m de resolución de la provincia de Teruel y se calculó la pendiente en porcentajes, aplicándose finalmente la máscara forestal procedente del MFA usada en las cartografías de estimación. El raster resultante fue reclasificado, asignando a cada píxel el valor del factor F_{pend} ([tabla 4](#)). La [figura 4](#) muestra el resultado obtenido.

4.1.3. Factor superficie de la masa forestal (F_{sup})

El tercer factor espacial señalado que incide a la hora de determinar la viabilidad económica de extraer la biomasa residual forestal con fines energéticos es la extensión de la masa forestal objeto de tratamiento. Según Asikainen *et al.* (2002), los costes de operación son menores cuando los trabajos forestales necesarios se centran en una zona extensa, ya que se reducen los tiempos de desplazamiento de un cuartel a otro; sin embargo, no se ha encontrado en la bibliografía consultada

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

un tamaño mínimo óptimo estándar. De esta manera, al igual que con los anteriores factores, hay que determinar un valor óptimo mínimo que se identificará con el máximo del índice propuesto (F_{sup}). A partir de ese máximo, el índice irá disminuyendo proporcionalmente para superficies menores que la establecida.

Para determinar la superficie mínima se utilizó el criterio de minimizar el tiempo consumido en los desplazamientos de la maquinaria pesada y del personal de un monte a otro. Así, para reducir estos tiempos de trabajo improductivos debido a los traslados, se buscó determinar un área mínima suficientemente extensa para trabajar en ella a tiempo completo durante una semana. Teniendo en cuenta lo recogido en los trabajos de Sanz y Piñeiro (2003) y Álvarez (2004) se obtiene que el rendimiento medio de la maquinaria limitante en la extracción de la biomasa residual (de la astilladora móvil o de la compactadora) es de aproximadamente 6 t/hora. Teniendo en cuenta este dato, una jornada de 8 horas de trabajo en 5 días laborables y suponiendo que el contenido en biomasa residual de la masa forestal sea aproximadamente un tercio de la cantidad óptima neta establecida, unas 13 t ha⁻¹, la superficie mínima que se obtiene para no mover la maquinaria durante una semana es de 18,5 ha.

En consecuencia, se adopta la superficie de 18,5 ha como valor mínimo óptimo de la extensión de la masa forestal, asignándose a ésta o mayores extensiones un valor de 100 en el F_{sup} . Para calcular el valor de este factor para teselas de menor área se utiliza nuevamente una función decreciente directamente proporcional. En este factor, al igual que en F_{BRF} , se clasifica la función en intervalos regulares, asignando como valor de F_{sup} el valor promedio de cada intervalo ([tabla 5](#)).

Para obtener este factor se utilizó la cartografía vectorial del MFA. En esta cartografía vectorial se creó un nuevo campo con la superficie en hectáreas de cada tesela, siendo posteriormente esta capa convertida a raster, adoptando cada píxel el valor de la superficie de la parcela que lo contiene. Finalmente, este raster es reclasificado, asignando a cada píxel el valor del factor F_{sup} de acuerdo con las equivalencias recogidas en la [tabla 5](#). La [figura 5](#) muestra el resultado obtenido.

4.1.4. Factor distancia a desembosque (F_{dist})

El coste de extracción de la biomasa es dependiente tanto de la naturaleza del terreno como de la distancia de saca o desembosque (Asikainen *et al.*, 2002). Por ello, en el presente subapartado se pretende crear un factor parcial que modele el efecto que tiene en la aptitud de una zona para el aprovechamiento de la biomasa residual la distancia entre la zona de corta de la biomasa y las pistas, caminos o carreteras donde habitualmente se sitúan las zonas de acopio del recurso.

Los datos de la relación productividad-distancia de desembosque se obtuvieron a partir de los resultados mostrados en los trabajos de Asikainen *et al.* (2002) y Sanz y Piñeiro (2003). El primero de ellos representa la variación de la productividad en función de la capacidad de carga de la maquinaria y de la distancia de desembosque, mientras que el segundo considera, junto a la distancia de desembosque, la productividad en función de la especie (pino o eucalipto) y la forma de

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

preparación del residuo. Los datos de productividad obtenidos se transformaron a porcentaje, utilizando para normalizar la muestra el máximo valor. Del estudio de estos datos se concluyó que la rentabilidad era máxima cuando las distancias de desembosque eran <100 m, disminuyéndose de una forma proporcional hasta llegar a distancias >3000 m, en las que el beneficio es nulo. De esta forma, al igual que en los anteriores factores, este óptimo de distancias <100 m fue igualado a un valor máximo de 100 en el factor F_{dist} ; a partir de ahí el valor va disminuyendo de forma proporcional hasta ser nulo para distancias ≥ 3000 m. La [tabla 6](#) muestra el valor de este factor F_{dist} para diferentes intervalos.

Para la obtención de este índice se utilizó como información base una capa vectorial proporcionada por la Dirección General de Gestión Forestal del Gobierno de Aragón con la red de pistas forestales, caminos y carreteras de la provincia de Teruel. A partir de esta capa se calcularon buffers que consideraban la distancia ortogonal en metros a estas infraestructuras según los intervalos establecidos. Posteriormente, estos buffers fueron convertidos individualmente a capas raster donde cada píxel tenía como valor la distancia a las pistas, caminos y carreteras. Estos raster fueron integrados en una única capa, que fue reclasificada en función de los valores del factor F_{dist} establecidos; por último, sobre esta capa se aplicó la máscara forestal del MFA. La [figura 6](#) recoge el resultado final.

4.2. Formulación de los índices de aptitud global

Para asignar a cada punto del territorio un valor de aptitud para el aprovechamiento de la biomasa residual como recurso energético se formularon dos índices de aptitud. Ambos combinan los cuatro factores parciales previamente calculados, pero lo hacen de forma diferente. Los dos índices fueron pensados para que variaran de 0 (zonas de nula aptitud) a 100 (zonas óptimas para el aprovechamiento de la biomasa).

El primer índice, denominado índice de aptitud multiplicativo (I_{aptM}), es calculado como el producto de los cuatro factores parciales, multiplicándose el resultado obtenido por 10^{-6} para que el valor final esté comprendido en el rango 0-100 (Ecuación 1).

$$I_{aptM} = F_{BRF} \cdot F_{pend} \cdot F_{sup} \cdot F_{dist} \cdot 10^{-6} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde F_{BRF} es el factor parcial en función de la cantidad de biomasa residual forestal; F_{pend} es el factor en función de la pendiente; F_{sup} es el factor en función de la superficie de la masa forestal; e F_{dist} es el índice en función de la distancia a desembosque.

El segundo índice, denominado índice de aptitud ponderado (I_{aptP}), es el resultado del sumatorio de los cuatro factores parciales considerados, pudiéndose asignar diferentes pesos entre 0 y 100 a cada uno de ellos para modelar su importancia en la aptitud global (Ecuación 2).

$$I_{aptP} = (w_{BRF} \cdot F_{BRF}) + (w_{pend} \cdot F_{pend}) + (w_{sup} \cdot F_{sup}) + (w_{dist} \cdot F_{dist}) \quad \text{Ecuación 2}$$

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

donde w_{BRF} , w_{pend} , w_{sup} y w_{dist} son los pesos que se asignan, respectivamente, a los índices parciales F_{BRF} , F_{pend} , F_{sup} y F_{dist} .

5. Resultados

5.1. Resultados de los factores parciales

5.1.1. Resultados del factor F_{BRF}

A pesar del alto valor fijado como indicador de las masas óptimas para ser explotadas en función de la cantidad – alto si se compara con el más alto de los trabajos consultados (37 t ha⁻¹ frente a 17,5 t ha⁻¹) –, un 13,62% de los bosques de pináceas de Teruel presentan un F_{BRF} de 100, lo que supone 37.167 ha. Además, tal y como se observa en la [figura 7](#), el porcentaje de estos bosques que queda con valores de $F_{BRF} > 61$ puntos es muy elevado, abarcando casi la mitad de la superficie boscosa total (44,29%, 120.838 ha).

El porcentaje de superficie con valores de F_{BRF} intermedios, entre 20 y 47 puntos, se sitúa en torno al 40%. La rentabilidad –o no– de explotar estos bosques dependerá en gran medida de los valores que se obtengan en los otros factores espaciales parciales considerados. Por último, reseñar que, desde el punto de vista de este factor, un 15% de las masas de pinos para las que se ha calculado la cantidad de biomasa residual forestal no son óptimas para la explotación, ya que obtienen una valoración igual o inferior a 7. Estas masas serán, además, a priori las menos rentables según los índices de aptitud que combinan los factores parciales, ya que aunque presenten valores muy altos en los otros tres factores parciales, el bajo valor en F_{BRF} explicará una baja puntuación global.

5.1.2. Resultados del factor F_{pend}

De acuerdo con lo esperado, el factor F_{pend} tiene un carácter mucho más restrictivo ([figura 8](#)). Así, en casi un 25% de la superficie forestal considerada resulta inviable retirar la biomasa presente, ya que se encuentra en zonas con pendientes >35%, que impiden el uso de determinada maquinaria, encareciéndose en demasía su extracción, y comprometen la sostenibilidad ambiental del aprovechamiento. Aun así, la cantidad de bosque que se considera óptima desde el punto de vista de este parámetro puede calificarse como elevada, ya que algo más del 46% presenta un F_{pend} superior a 86 puntos, lo que supone un total de 125.800 ha.

La rentabilidad-viabilidad de explotar el restante 29% dependerá, al igual que en el caso de la superficie clasificada con valores intermedios de F_{BRF} , de lo obtenido para los otros tres factores considerados en esas áreas con pendientes entre el 20-35%. Si en ellas existe una gran cantidad de

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

recurso, son masas forestales extensas y la distancia de desembosque es pequeña serán óptimas, mientras que si se dan cantidades, superficies y distancias a pistas y caminos, intermedias su aptitud para la obtención de recurso será escasa o nula.

5.1.3. Resultados del factor F_{sup}

El 98,09% de las teselas forestales para las que se ha estimado la biomasa residual tienen una extensión >18,5 ha. De esta manera, casi la totalidad de la superficie inventariada queda con un valor 100 en el índice F_{sup} , no incluyéndose en ninguno de los intervalos restantes superficies que supongan >0,5% de la total. Este resultado es producto, en primer lugar, de la escala de trabajo utilizada en la elaboración del MFA (1:50.000) y, en segundo, de que se ha aplicado una reclasificación del mismo hecha con el objetivo de sintetizar la leyenda original en categorías más simples, agrupando las teselas por especies. Este doble hecho hace que el tamaño de la tesela final utilizada sea bastante grosero, tal y como evidencia el factor F_{sup} .

Por tanto, los resultados obtenidos sugieren que el factor F_{sup} es superfluo, ya que no aporta nada a la hora de determinar la aptitud de las masas para la explotación del recurso; casi todas ellas resultan igualmente idóneas desde el punto de vista de su extensión, al menos en función de la cartografía de referencia empleada. Sin embargo, dado el carácter restrictivo que tiene el índice de aptitud multiplicativo I_{aptM} —ya que, al multiplicarse todos los factores por igual, sólo las mejores zonas en todos ellos resultarán óptimas— se decidió mantener el F_{sup} en su cálculo. En cambio, es eliminado del índice I_{aptP} , por haberse constatado que su peso relativo con respecto a los demás índices parciales es mínimo o prácticamente nulo.

5.1.4. Resultados del factor F_{dist}

Tal y como se observa en la [figura 9](#), la mayor parte de las masas forestales presenta unos valores F_{dist} elevados. En concreto, el 81,26% de la superficie inventariada presenta un valor ≥ 90 , lo que significa que está situada a <400 m de una pista, camino o carretera desde donde realizar el desembosque del recurso. Dentro de este grupo, las áreas clasificadas con un F_{dist} de 100 son las más abundantes, representando casi un 31,5% de la superficie total. Un último dato a destacar, que refuerza la viabilidad de explotación de los bosques de pináceas de Teruel teniendo en cuenta únicamente este factor, es que tan sólo 3.990 ha tienen un F_{dist} <60, apenas el 1,5% del total.

Este resultado, fruto de la existencia de una buena infraestructura forestal y de un exhaustivo inventario de la misma por parte de la Administración autonómica, indica que la distancia de desembosque no va a ser un factor limitante a la hora de determinar si una zona resulta óptima o no a la hora de extraer su biomasa residual.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

5.2. Resultados de los índices de aptitud global

5.2.1. Resultados del índice de aptitud multiplicativo (I_{aptM})

La cartografía obtenida mediante la aplicación del índice de aptitud multiplicativo I_{aptM} ([figura 10](#)) permite visualizar y seleccionar de forma precisa aquellas zonas en las que es, o puede ser, viable económicamente el aprovechamiento de la biomasa residual forestal con fines energéticos manteniendo criterios de sostenibilidad de los bosques. Aquellas masas con un valor entre 50 y 70 serán zonas con un moderado interés, mientras que valores >70 identificarán zonas calificables como muy apropiadas. Sin embargo, es necesario volver a subrayar, antes de interpretar los resultados obtenidos, el carácter restrictivo de este índice multiplicativo, dado que sólo es posible obtener para él valores altos cuando los 4 factores considerados presentan sus valores máximos. Así, por ejemplo, si una zona presenta un valor de 90 en los 4 índices parciales considerados, el resultado del I_{aptM} será de 65,61 puntos.

Teniendo en cuenta la anterior premisa, no es extraño que, tal y como se observa en la [figura 11](#), sólo el 25% de la superficie forestal inventariada sea considerada como de moderado interés para la explotación de biomasa, mientras que las zonas consideradas como muy apropiadas ($I_{aptM} \geq 70$) se reducen apenas al 10,80%. Por último reseñar que un total de 7.251 ha se identifican como zonas excepcionalmente apropiadas, dado que presentan valores de I_{aptM} superiores a 90. Estas zonas corresponden a masas forestales de >37 t ha⁻¹, con una superficie $>18,5$ ha, situadas sobre un terreno con pendientes entre el 0 y el 10% y con una distancia de desembosque <200 m.

Como se observa en la cartografía, tres zonas son las que concentran la mayor parte de las masas forestales que han quedado clasificadas como de un interés medio-alto para su explotación: la Sierra de Albarracín (Sierra del Tremedal y Pinares de Ródeno), la Sierra de Cucalón y el sector nororiental de la Sierra de Gúdar. Dado que los dos factores más restrictivos, de los cuatro considerados, son la cantidad de recurso y la pendiente, es fácil concluir que estas tres zonas estarán caracterizadas por una alta cantidad de biomasa residual y por unas pendientes bajas; la visualización de las cartografías de los índices parciales F_{BRF} e F_{pend} así lo confirma ([figura 3](#) y [figura 4](#)).

5.2.2. Resultados del índice de aptitud ponderado (I_{aptP})

Como ya se ha adelantado, el factor parcial F_{sup} no es utilizado en el cálculo del índice de aptitud ponderado (I_{aptP}) dada su escasa significación (98% de la superficie con $F_{sup}=100$). Para conocer cómo influyen las ponderaciones asignadas en este índice a las tres variables restantes se llevaron a cabo un total de 3 pruebas, asignando un peso mayor en cada una de ellas a cada índice parcial sobre los otros dos ([tabla 7](#)).

Las tres pruebas realizadas con el índice I_{aptP} ([figura 12](#), [figura 13](#) y [figura 14](#)) presentan una mayor cantidad de superficie forestal con aptitudes medias y altas para la extracción de biomasa

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

residual que con el índice I_{aptM} . Así, en la cartografía resultado de asignar un peso de 0,6 al índice F_{BRF} y 0,2 a F_{pend} y F_{dist} (prueba A, [figura 12](#) y [figura 15](#)), un 65,40% de la superficie queda clasificada con un valor por encima de los 50 puntos y un 35,35% tiene un índice superior a 70. De esta manera, a pesar de la alta cantidad de biomasa establecida como valor óptimo en el índice F_{BRF} (37 t ha⁻¹) –aquel con mayor peso en esta prueba–, un total de 96.451 ha quedan clasificadas como masas muy apropiadas para la explotación del recurso. Las masas excepcionalmente apropiadas, por encima de los 90 puntos ascienden a 36.429 ha, es decir, a un 13,35% del total.

El análisis visual de la cartografía de esta prueba A permite confirmar las conclusiones obtenidas con el índice I_{aptM} en relación con la distribución de las zonas óptimas para el aprovechamiento del recurso. Así, la Sierra de Albarracín (principalmente en los sectores de Sierra del Tremedal y Pinares de Rodeno), la Sierra de Cucalón y el sector nororiental de la Sierra de Gúdar se confirman como las mejores zonas, si bien hay que destacar que la superficie considerada como excepcionalmente o muy adecuada es mucho mayor. Esta situación se observa, sobre todo, en la Sierra de Gúdar, ya que la mayor parte del entramado de sierras que la componen presenta estos elevados valores, no sólo las sierras nororientales que resultaban destacadas con I_{aptM} . Por último, señalar la presencia de una nueva e importante zona con valores altos de aptitud según esta prueba A del índice I_{aptP} ; se trata del sector nororiental, en la comarca del Matarraña, donde se localizan los Puertos de Beceite. Asimismo destacar que, además de en estas zonas, aparecen numerosas teselas de menor tamaño con altos valores de este índice por todo el territorio provincial.

A pesar de que la cartografía obtenida en la prueba B es fruto de otorgar más peso a uno de los factores más restrictivos –la pendiente– frente a los otros dos considerados (0,6 a F_{pend} y 0,20 a F_{BRF} y F_{dist}), los resultados ([figura 13](#) y [figura 16](#)) son más semejantes a los de la prueba A que a los obtenidos con el índice I_{aptM} . Así, tres cuartas partes de la superficie inventariada queda clasificada con valores de aptitud iguales o superiores a 50, elevándose el porcentaje de masas forestales muy apropiadas para la explotación –las que presentan valores por encima de 70 puntos– al 56%; es decir, más de la mitad de la superficie inventariada. El porcentaje de masas con valores superiores a 90 puntos se sitúa en esta ocasión alrededor del 10%.

Por tanto, los resultados de esta prueba B reflejan una situación de rentabilidad-viabilidad de explotación algo más optimista que la de la prueba A. Esta conclusión también se desprende del análisis comparado de las cartografías obtenidas. Así, las zonas consideradas como óptimas son, a grandes rasgos, las mismas en una y otra, existiendo dos matices: (i) las superficies situadas en la orla de las zonas más rentables en la prueba A han pasado a pertenecer también a este intervalo en la cartografía de la prueba B; (ii) la superficie óptima del sector de los Puertos de Beceite se ha visto reducida, debido a los altos porcentajes de pendiente que la caracterizan; en cambio, las zonas llanas de este sector, situadas al norte, presentan altos índices de aptitud, compensándose el dato medio.

Por último, la prueba C del índice I_{aptP} es la que ofrece unos resultados más posibilistas en cuanto a la aptitud de las masas forestales inventariadas de cara a su explotación ([figura 14](#) y [figura 17](#)). Según los resultados obtenidos, la práctica totalidad de la superficie inventariada es de un interés moderado (el 98,28% tiene un valor por encima de los 50 puntos), aunque lo que quizás es más llamativo es que algo más del 77% queda clasificado como muy apropiado. La obtención de

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

valores tan elevados se debe a la distribución de pesos efectuada (0,6 a F_{dist} y 0,20 a F_{BRF} y F_{pend}), que ha sobreestimado el protagonismo de la variable F_{dist} , la menos restrictiva de las tres dado que el 81,26% de las masas tenían una pista o camino a <400 m, lo que le otorgaba un valor de 90. Así, en la cartografía sólo se identifican como zonas menos óptimas aquellas con una menor densidad de infraestructuras viarias, dependiendo la mayor o menor aptitud del resto de la combinación por igual de los factores cantidad y pendiente.

6. Discusión

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología útil para valorar y espacializar la viabilidad de explotar la biomasa residual forestal presente en un territorio desde el punto de vista técnico y económico sin perder de vista la sostenibilidad ecológica de los bosques. Ello es así por cuanto los índices de aptitud global propuestos integran cuatro factores críticos a la hora de establecer la adecuación de las masas forestales para hacer rentable la extracción: (i) la cantidad potencial de recurso que se puede obtener; (ii) la pendiente, que controla la posibilidad de utilizar o no una maquinaria u otra para hacer más eficiente el trabajo; (iii) la existencia de masas de superficie suficiente para minimizar los tiempos improductivos de trabajo debido a los desplazamientos; y (iv) la distancia de desembosque, que, además del coste de transporte, también controla, al igual que la variable superficie, la cantidad de recurso que se puede extraer en cada jornada de trabajo (Asikainen *et al.*, 2002; Álvarez, 2004; Esteban *et al.*, 2004; Garañeda y Bengoa, 2005). El resultado de integrar estos cuatro factores parciales con los modelos de síntesis propuestos mediante las funciones implementadas en un SIG permite la obtención de una cartografía de alta resolución espacial (25 m de píxel), facilitándose así la localización y delimitación precisa de las zonas más factibles de explotación de este recurso. Ello ha sido posible principalmente por la utilización de imágenes de satélite en la fase de evaluación del recurso, que ha permitido estimar la variable estudiada ($R^2=0,711$; $RMSE_r=26,67$) superando los inconvenientes de inventarios tradicionales y de métodos basados exclusivamente en la utilización de SIG (Lu, 2006).

Las características de la provincia de Teruel y los criterios utilizados a la hora de valorar estos cuatro factores hacen que la cantidad de biomasa y la pendiente sean las variables más restrictivas para considerar la explotación de una zona como adecuada. Sin embargo, es necesario señalar que hay diferencias entre estas dos variables, ya que, mientras que los intervalos propuestos para modelar la incidencia de la pendiente son bastante rígidos (la eficiencia de la maquinaria es menor conforme aumenta la pendiente hasta un umbral en el que ya no se puede utilizar), los propuestos para modelar el papel de la cantidad son bastante más arbitrarios, pudiéndose modificar dependiendo de las necesidades de la planta de generación eléctrica y/o de las experiencias de futuros trabajos encaminados a dilucidar esta cuestión. A este respecto recordar que en este trabajo, debido a que se ha adoptado una perspectiva muy conservadora, se ha utilizado un valor óptimo para definir los intervalos de este índice parcial muy elevado –más del doble– en comparación con el de otros trabajos. En concreto, con el objeto de preservar 11 t ha⁻¹ de residuo forestal que garanticen la sostenibilidad de los bosques, se ha aplicado un valor que supera en 19,5 t ha⁻¹ el valor más alto propuesto en los trabajos consultados, que era de 17,5 t ha⁻¹. La utilización de un valor más bajo que también garantizara un elevado número de nutrientes al suelo, que podrían ser

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

complementados con la necromasa procedente de arbustos, matorrales y herbáceas anuales, hubiera hecho que la valoración de la aptitud de los bosques turolenses fuera mucho más alta que la finalmente obtenida con los dos índices utilizados.

El carácter menos limitante de los factores parciales relacionados con la superficie de la masa boscosa (F_{sup}) y con la distancia de desembosque (F_{dist}) también se debe a diferentes motivos. En el caso del índice F_{sup} , la escasa incidencia en la valoración final de la aptitud de las masas forestales se debe a la cartografía utilizada para delimitar la superficie forestal, que tiene un tamaño de tesela demasiado grosero. Así, esta variable sólo tendrá incidencia en la evaluación final si se utiliza como referencia para delimitar la superficie forestal una cartografía de más detalle, que proporcione teselas más precisas. Por su lado, el escaso poder restrictivo del índice F_{dist} no guarda relación con la metodología seguida, debiéndose, exclusivamente, a la existencia de una buena infraestructura de pistas forestales y caminos en el territorio estudiado.

Los dos índices creados para combinar los factores parciales y ofrecer una valoración integrada de la aptitud de las masas forestales para la obtención de la biomasa forestal también presentan diferencias significativas. Así, el índice I_{aptM} , al estar formulado como una simple multiplicación de factores, presenta una complicada lectura, teniendo además un carácter restrictivo muy importante, ya que solamente da un valor alto a aquellas zonas en las que los cuatro factores tienen valores máximos. Por su parte, el índice ponderado I_{aptP} , además de presentar un carácter menos restrictivo, permitiendo presentar valores superiores a 90 aunque alguno de los factores adopte un valor medio, tiene la importante la ventaja de permitir modificar el peso de cada factor de acuerdo con los criterios de los técnicos forestales y de los gestores del territorio. La complejidad de este índice radica, por tanto, en la dificultad de fijar unos pesos ajustados y objetivos según experiencias reales que se adapten bien al efecto parcial de cada factor y a la realidad del territorio evaluado.

7. Conclusiones

Mediante el uso de herramientas SIG e imágenes de satélite se ha logrado localizar las zonas más adecuadas para el aprovechamiento energético de biomasa residual sin perjudicar la sostenibilidad ecológica de los bosques. Esto se logra formulando un índice que integra las cuatro variables espaciales básicas identificadas que intervienen en el grado de aptitud de una masa para hacer rentable y sostenible la extracción del recurso. De los dos índices creados, el que opera mediante la suma ponderada de los cuatro factores considerados (I_{aptP}) resulta el más adecuado, ya que es menos restrictivo, más fácil de interpretar y permite modificar el peso de cada factor de acuerdo con los criterios técnicos. De las cuatro variables consideradas, la cantidad de biomasa y la pendiente resultan las más limitantes para la rentabilidad de la explotación.

Por último, señalar dos posibles mejoras sobre el índice de aptitud I_{aptP} que pueden abordarse en futuros trabajos: (i) el índice de cantidad de biomasa F_{BRF} podría incorporar información sobre la necesidad de tratamientos selvícolas en las masas forestales estudiadas, de forma que no se prime únicamente la cantidad potencial de recurso existente, sino también la

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

pertinencia de extraer en ese momento el recurso; (ii) dado que los índices parciales considerados identifican factores muy influyentes en el coste de explotación del recurso, se debería intentar reclasificar estas variables –o los pesos asignados– en función del coste de extracción expresado en €/t. De esta manera se podría obtener cartografía del coste real de la extracción del recurso en cada punto del territorio analizado.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el contexto del proyecto LIGNOSTRUM (AGL2002-03917) y una beca FPU (AP2003-3097) del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, A. (2004): *Estudio sobre la utilización de la biomasa con fines energéticos: análisis metodológico sobre abastecimiento y costes*. Valladolid, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Castilla y León.
- Asikainen, A., Björheden, R. y Nousiainen, I. (2002): "Cost of wood energy", en Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T. y Smith, C.T. (Ed.): *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice*. Dordrecht, Kluwer Academic Pub., pp. 125-157.
- Domínguez, J. (2002): *Los sistemas de información geográfica en la planificación e integración de energías renovables*. Madrid, CIEMAT, Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Eriksson, H.M., Hall, J.P. y Helynen, S. (2002): "Rationale for forest energy production", en Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T. y Smith, C.T. (Ed.): *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice*. Dordrecht, Kluwer Academic Pub., pp. 1-17.
- Esteban Pascual, L.S., Pérez Ortiz, P., Ciria Ciria, P. y Carrasco García, J.E. (2004): *Evaluación de los recursos de biomasa forestal en la provincia de Soria. Análisis de alternativas para su aprovechamiento energético*. Madrid, CIEMAT, Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- Esteban, L.S., García, R., Carrasco, J., (2008): "Biomass Resources and Costs in Spain and Southern EU Countries. Towards a Common Methodology and Assessment", en Schmid, J., Grimm, H.P., Helm, P. y Grassi, A. (Ed.): *Proceedings of the 16th European Biomass Conference and Exhibition*. Florence, ETA-Renewable Energies, pp. 266-273.
- Franklin, S.E. (2001): *Remote sensing for sustainable forest management*. New York, Taylor & Francis-CRC Press.
- García Martín, A., Pérez Cabello, F. y de la Riva Fernández, J. (2006): "Evaluación de los recursos de biomasa residual forestal mediante imágenes del satélite Landsat y SIG", *GeoFocus*, 6, pp. 205-230.
- García-Martín, A., de la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2007): "Evaluación de la influencia de la heterogeneidad de los bosques mediterráneos en la estimación de biomasa residual a partir de imágenes Landsat", en Rivas, R., Grisotto, A., Sacido, M. (Ed.): *Teledetección - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional*. Mar del Plata, Martín, pp. 35-42.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

- Garañeda, R.J. y Bengoa, L. (2005) "Estudio de disponibilidad de biomasa en seis zonas de Castilla y León", en S.E.C.F. (Ed.): *La ciencia forestal: respuestas para la sostenibilidad. 4º Congreso Forestal Español*. Zaragoza, Sociedad Española de Ciencias Forestales, (CD-Rom).
- Guillén, J.A. y Lozano, M.V. (Coord.) (2005): *Atlas de Teruel. Una visión práctica del territorio*. Teruel, Caja Inmaculada – Proyecto REVITAL – INTERREG III B SUDOE - FEDER.
- Hakkila, P. (2003): *Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999-2003*. Helsinki, Technology programme report 5/2003, Tekes.
- Hakkila, P. y Parikka, M. (2002): "Fuel resources from the forest", en Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T. y Smith, C.T. (Ed.): *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice*. Dordrecht, Kluwer Academic Pub., pp. 19-48.
- Hyypä, H.J. y Hyypä, J.M. (2001): "Effects of stand size on the accuracy of remote sensing-based forest inventory", *IEEE Transactions Geosciences and Remote Sensing*, 39, pp. 2613-2621.
- IAEST (2010): *Información Estadística Territorial. Provincia de Teruel*. Zaragoza, Instituto Aragonés de Estadística, Gobierno de Aragón. [Consulta: 19-07-2010]. Disponible en http://bonansa.aragob.es:81/iaest/fic_mun/pdf/P44.pdf.
- IDAE (2005): *Plan de Energías Renovables en España 2005-2010*. Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- IDAE (2007): *Energía de la biomasa*. Madrid, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- Jarabo Friedrich, F. (1999): *La energía de la biomasa*. Madrid, S.A.P.T. Publicaciones Técnicas.
- Lorente, J.M. (2009): "Situación energética y sector forestal: un análisis desde la perspectiva aragonesa", *Foresta*, 43-44, pp. 132-139.
- Lu, D. (2006): "The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation", *International Journal of Remote Sensing*, 27, pp. 1297-1328.
- McNeil Technologies (2003): *Biomass Resource Assessment and Utilization Options for Three Counties in Eastern Oregon*. Salem, Oregon Department of Energy.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2010a): *La energía en España 2009*. Madrid, Secretaría General Técnica, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2010b): *Plan de Energías Renovables 2011-2020. Evaluación ambiental estratégica. Documento de inicio*. Madrid, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- Ministerio de Medio Ambiente (1996): *Segundo Inventario Forestal Nacional (1986-1995): Aragón, Teruel*. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente.
- Muukkonen, P. y Heiskanen, J. (2005): "Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data", *Remote Sensing of Environment*, 99, pp. 434-447.
- Powell, S.L., Cohen, W.B., Healey, S.P., Kennedy, R.E., Moisen, G.G., Pierce, K.B. y Ohmann, J. L. (2010): "Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: A comparison of empirical modeling approaches", *Remote Sensing of Environment*, 114, pp. 1053-1068.
- Raison, R.J. (2002): "Environmental sustainability of forest energy production", en Richardson, J., Björheden, R., Hakkila, P., Lowe, A.T. y Smith, C.T. (Ed.): *Bioenergy from Sustainable Forestry: Guiding Principles and Practice*. Dordrecht, Kluwer Academic Pub., pp. 159-263.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

Ranta, T. (2005): "Logging residues from regeneration fellings for biofuel production- a GIS based availability analysis in Finland", *Biomass and Bioenergy*, 28, pp. 171-182.

Salvador, R. y Pons, X. (1998): "On the applicability of Landsat TM images to Mediterranean forest inventories", *Forest Ecology and Management*, 104, pp. 193-208.

Sanz, F. y Piñeiro, G (2003): "Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. Parte I: Situación Actual y Evaluación de Sistemas de Tratamiento", *Revista CIS-Madera*, 10, pp. 6-25.

Tomppo, E., Olsson, H., Ståhl, G., Nilsson, M., Hagner, O. y Katila, M. (2008): "Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases", *Remote Sensing of Environment*, 112, pp. 1982-1999.

Velázquez, B. (2006): "Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética", *Ecosistemas*, 15, pp. 77-86.

TABLAS

Tabla 1. Modelos de regresión ajustados

Modelo	Variable	R^2_a	β_1	β_0	RMSE (t ha-1)	RMSE _r (%)
1	ln_MID57	0,711	-4,663	18,879	4,843	26,67
2	ln_TM5	0,713	-5,073	17,933	4,591	43,38
3	ln_TM5	0,750	-5,053	17,900	4,767	51,91
4	ln_TM7	0,735	-3,906	12,603	6,144	42,92
5	ln_TM5	0,750	-5,204	18,253	4,792	34,93

Fte. Elaboración propia

Tabla 2. Valores de F_{BRF} en función de la cantidad de biomasa residual calculada en t ha-1

T ha-1	F_{BRF}	T ha-1	F_{BRF}
≥ 37	100	10 - 15	34
30 - 37	91	5 - 10	20
25 - 30	74	0,1 - 5	7
20 - 25	61	0 - 0,1	0
15 - 20	47		

Fte. Elaboración propia

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

Tabla 3. Valores de F_{BRF} en función de la cantidad de biomasa residual calculada en t/píxel

T/píxel	F_{BRF}	T/píxel	F_{BRF}
$\geq 2,31$	100	0,62 - 0,93	34
1,87 - 2,31	91	0,31 - 0,62	20
1,56 - 1,87	74	0,01 - 0,31	7
1,25 - 1,56	61	0,00 - 0,01	0
0,93 - 1,25	47		

Fte. Elaboración propia

Tabla 4. Valores de F_{pend} en función de la pendiente (%) del terreno

Pendiente (%)	Eficiencia	F_{pend}
0 - 10	70	100
10 - 20	60	86
20 - 35	45	64
>35	0	0

Fte. Elaboración propia

Tabla 5. Valores de F_{sup} en función de la superficie (ha) de la masa forestal

Superficie de la masa	F_{sup}	Superficie de la masa	F_{sup}
$\geq 18,5$	100	8 - 10	49
16 - 18,5	94	6 - 8	38
14 - 16	81	4 - 6	27
12 - 14	70	2 - 4	16
10 - 12	59	0 - 2	5

Fte. Elaboración propia

Tabla 6. Valores de F_{dist} en función de la distancia (m) a desembosque

Distancia	F_{dist}	Distancia	F_{dist}
0 - 100	100	800 - 900	72
100 - 200	97	900 - 1000	69
200 - 300	93	1000 - 1500	60
300 - 400	90	1500 - 2000	43
400 - 500	86	2000 - 2500	26
500 - 600	83	2500 - 3000	7
600 - 700	79	≥ 3000	0
700 - 800	76		

Fte. Elaboración propia

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

Tabla 7. Pesos asignados a cada uno de los factores parciales considerados en las tres pruebas con el índice I_{aptP}

Pruebas	Peso asignado a F_{BRF}	Peso asignado a F_{pend}	Peso asignado a F_{dist}
A	0,6	0,2	0,2
B	0,2	0,6	0,2
C	0,2	0,2	0,6

Fte. Elaboración propia

FIGURAS

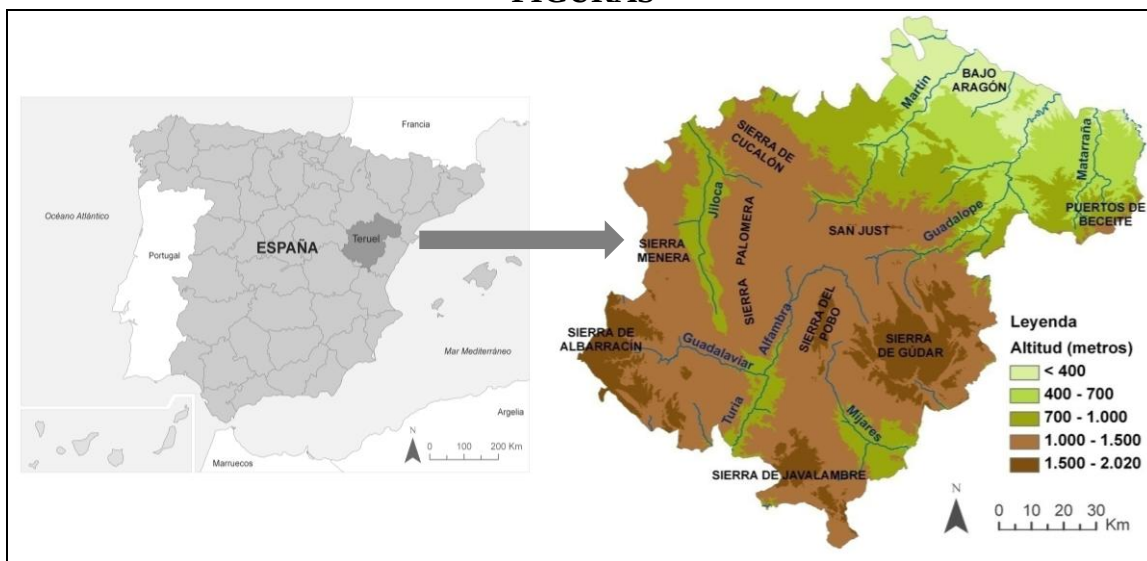


Figura 1. Localización del área de estudio.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

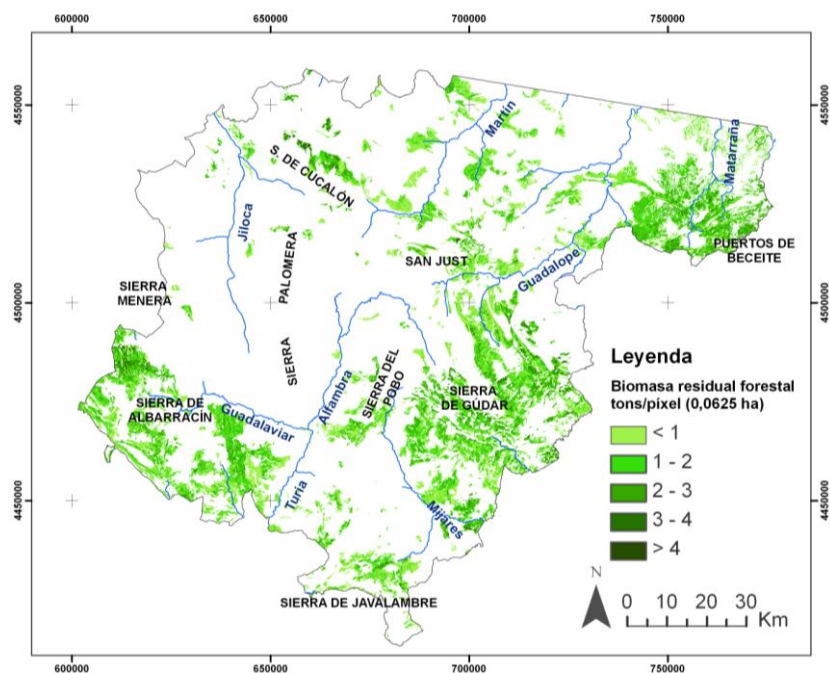


Figura 2. Biomasa residual en la provincia de Teruel en julio de 2008 expresada t/píxel (1 píxel=0,0625 ha).

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

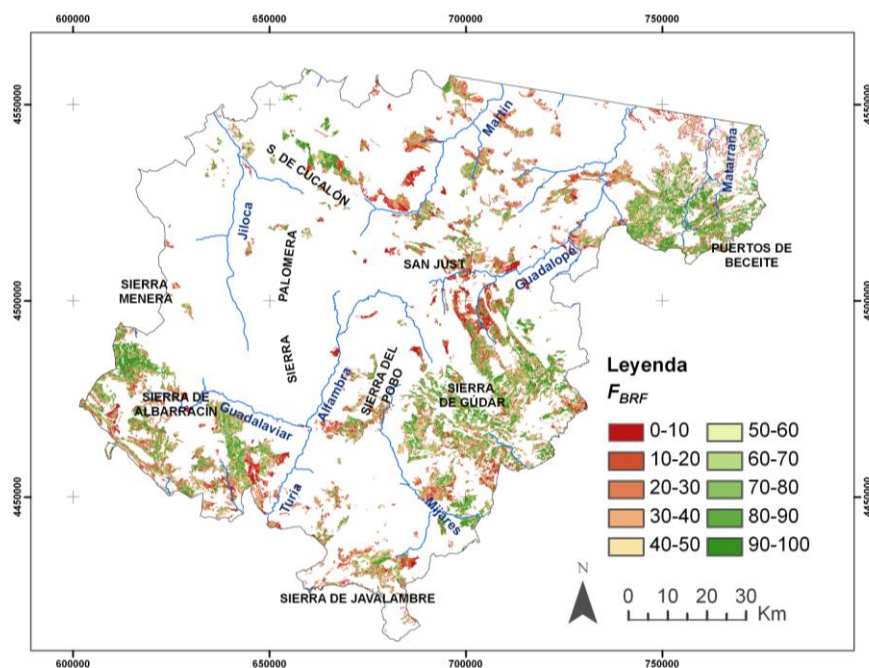


Figura 3. Cartografía obtenida tras reclasificar la biomasa residual estimada en 2008 con los valores del factor F_{BRF} .

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

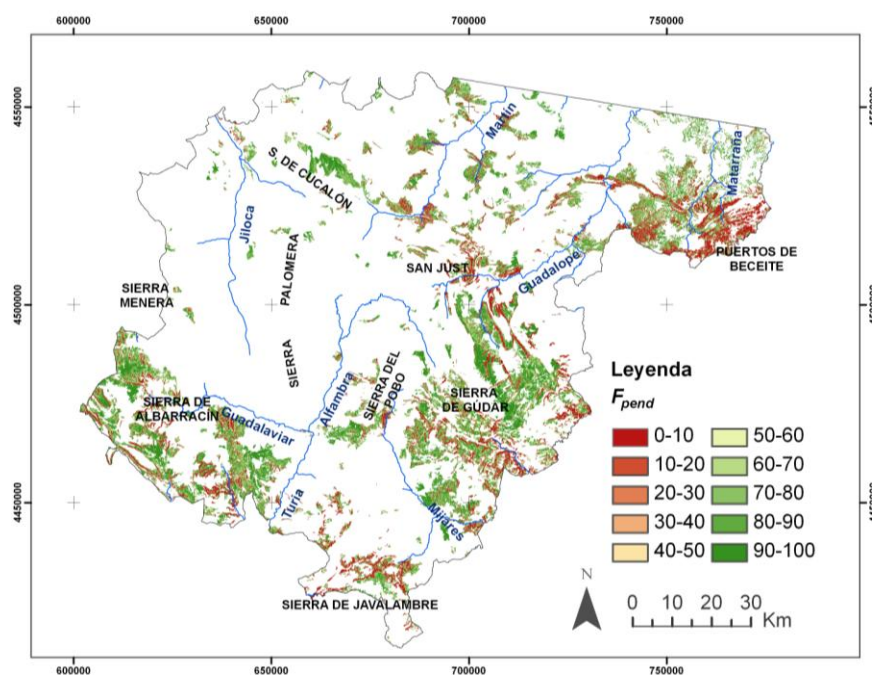


Figura 4. Cartografía obtenida tras reclasificar la pendiente de las zonas forestales con los valores del factor F_{pend} .

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

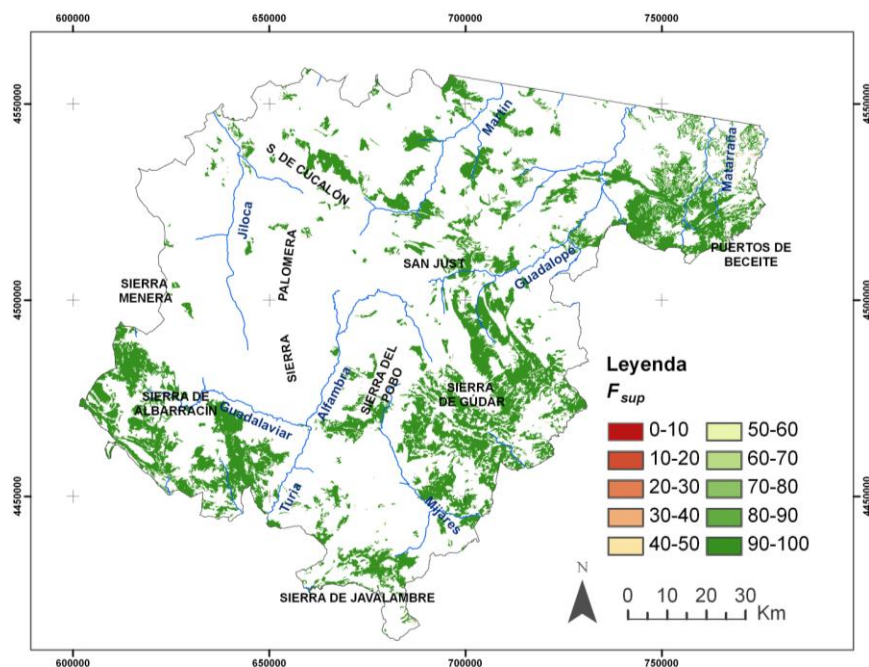


Figura 5. Cartografía obtenida tras reclasificar la superficie de cada tesela forestal con los valores del factor F_{sup} .

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

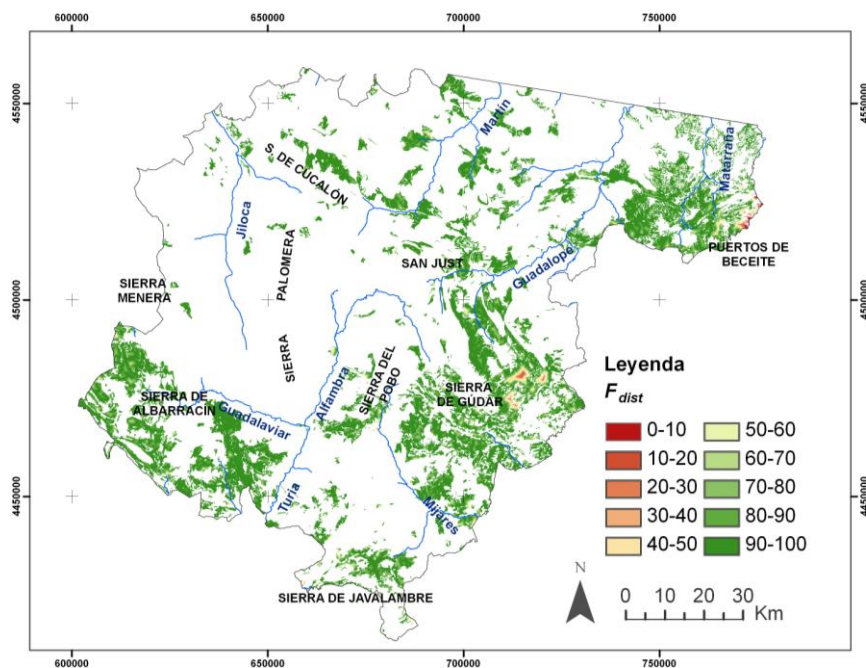


Figura 6. Cartografía obtenida tras reclasificar la distancia a pistas, caminos y carreteras con los valores del factor F_{dist} .

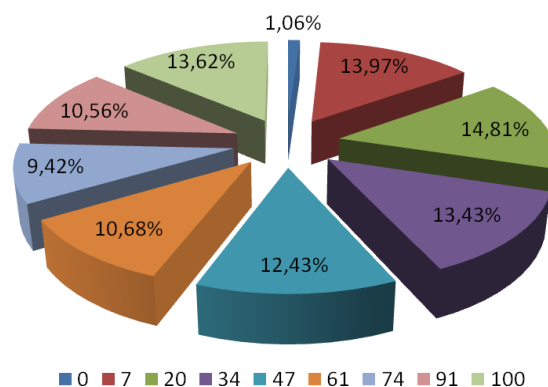


Figura 7. Distribución de la superficie forestal de pináceas respecto al factor F_{BRF} .

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

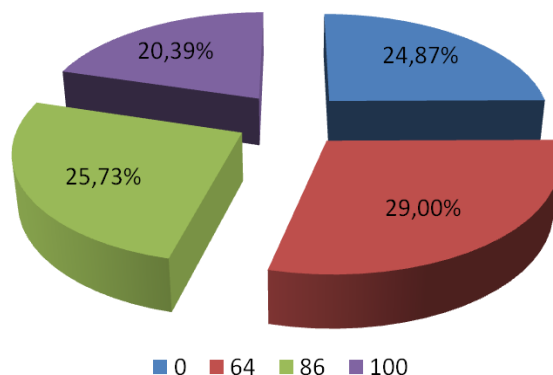


Figura 8. Distribución de la superficie forestal de pináceas respecto al factor F_{pend} .

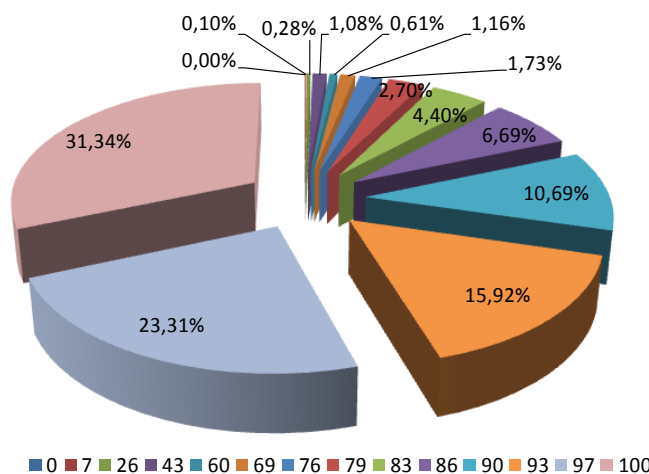


Figura 9. Distribución de la superficie forestal de pináceas respecto al factor F_{dist} .

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

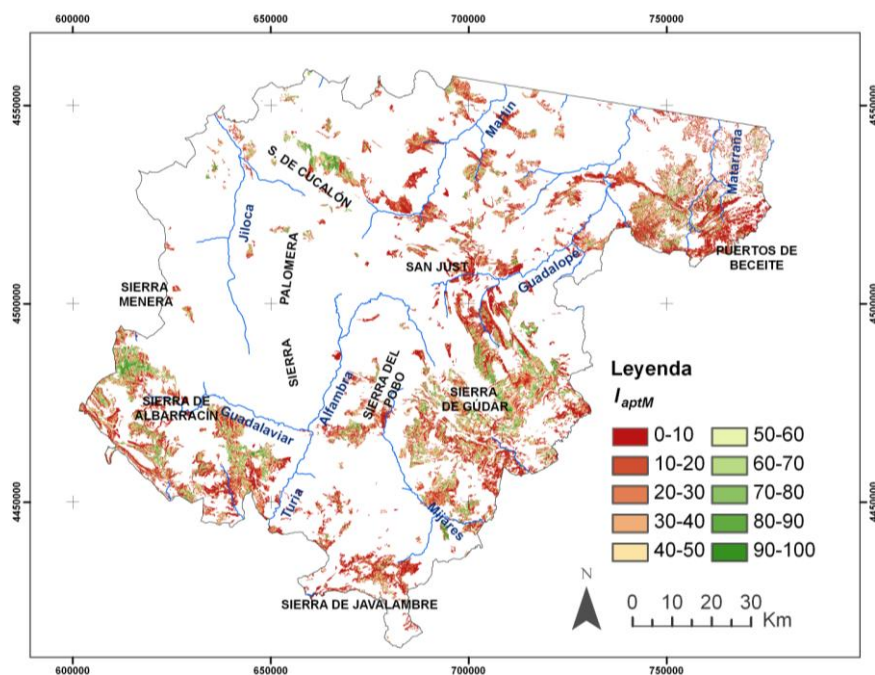


Figura 10. Cartografía obtenida tras aplicar el índice I_{aptM} .

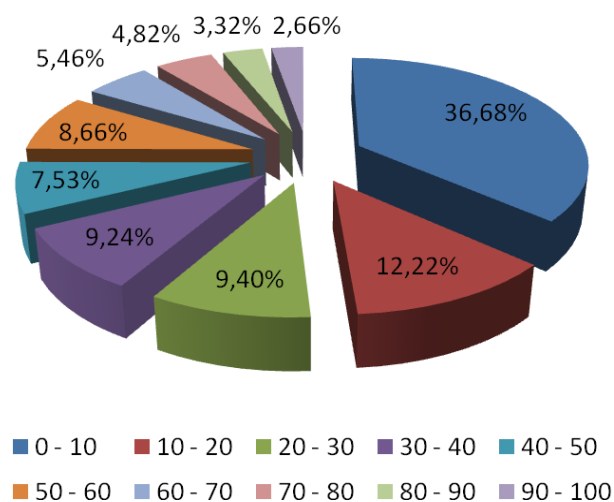


Figura 11. Distribución de la superficie forestal de pináceas respecto al índice I_{aptM} .

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

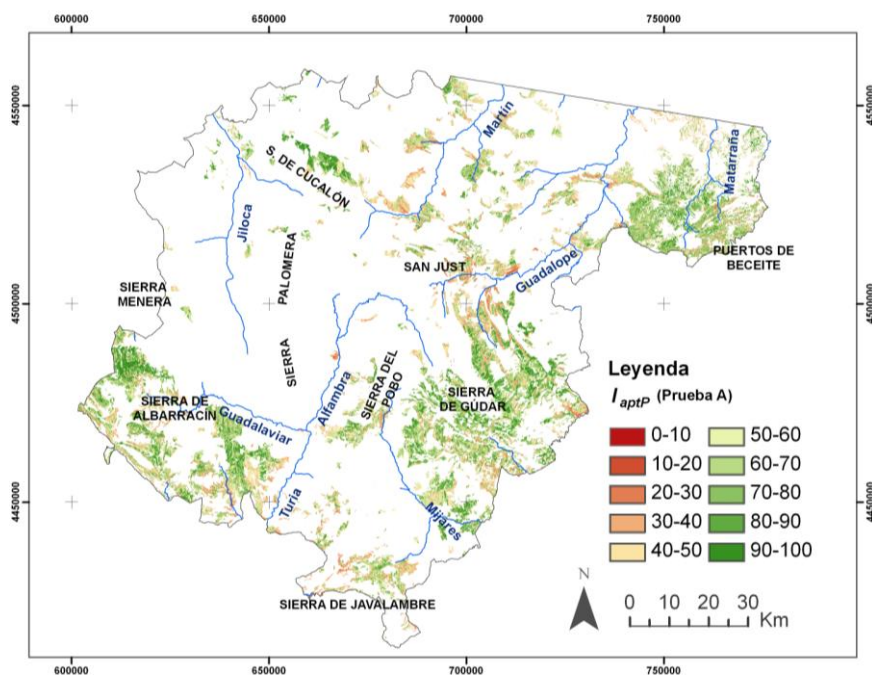


Figura 12. Cartografía obtenida tras aplicar el índice I_{aptP} con los pesos de la prueba A.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

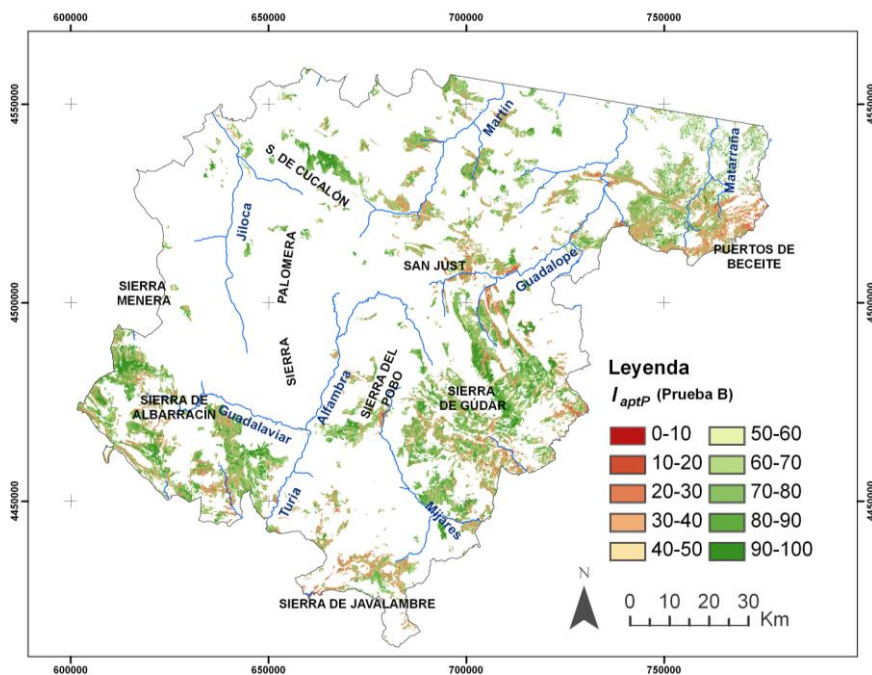


Figura 13. Cartografía obtenida tras aplicar el índice I_{aptP} con los pesos de la prueba B.

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

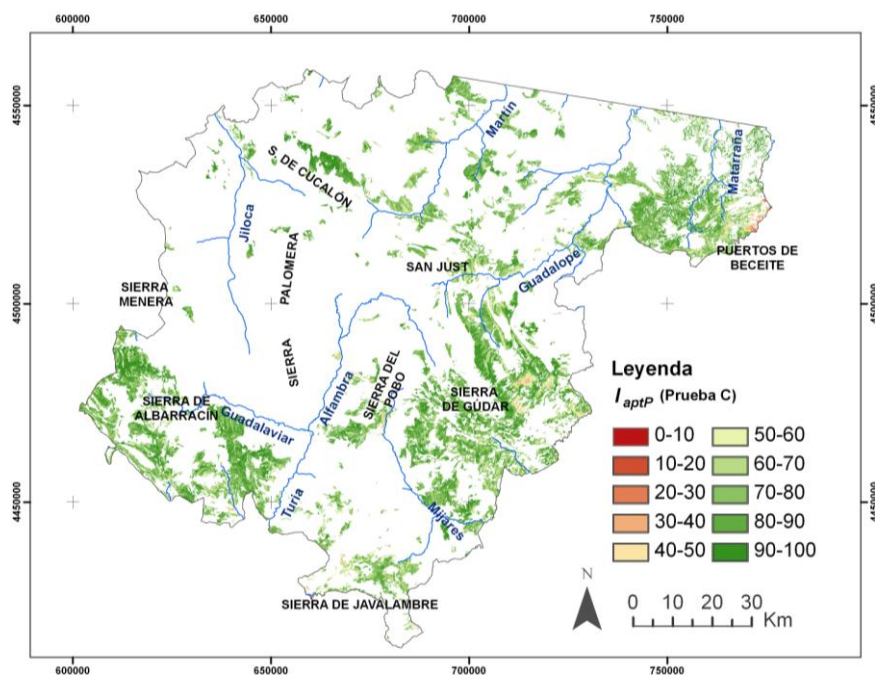


Figura 14. Cartografía obtenida tras aplicar el índice I_{aptP} con los pesos de la prueba C.

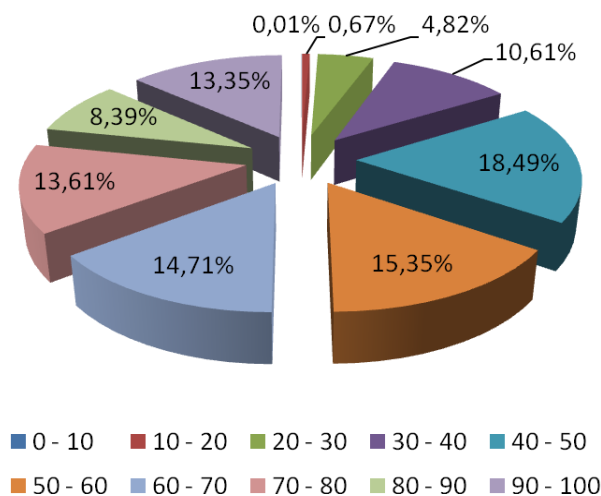


Figura 15. Distribución de la superficie forestal de pináceas en la prueba A del índice I_{aptP} .

García-Martín, A., García Galindo, D., Pascual, J., De la Riva, J., Pérez-Cabello, F. y Montorio, R. (2011): "Determinación de zonas adecuadas para la extracción de biomasa residual forestal en la provincia de Teruel mediante SIG y teledetección", *GeoFocus (Artículos)*, nº 11, p. 19-50. ISSN: 1578-5157

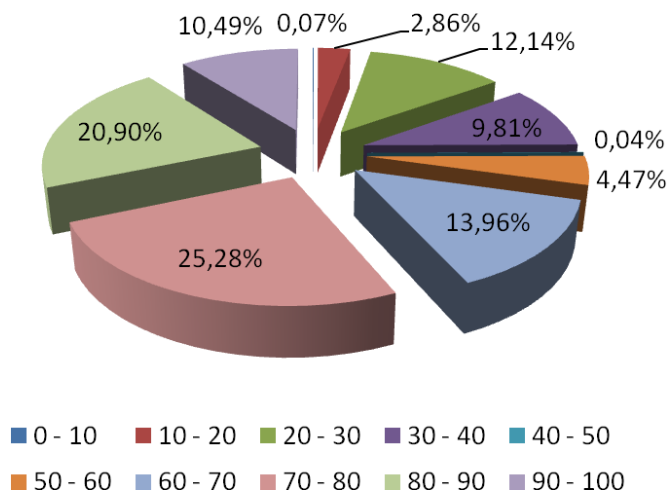


Figura 16. Distribución de la superficie forestal de pináceas en la prueba B del índice I_{aptP} .

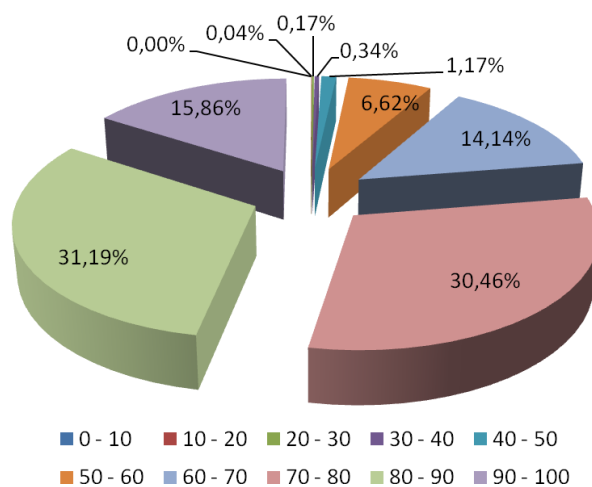


Figura 17. Distribución de la superficie forestal de pináceas en la prueba C del índice I_{aptP} .