



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Modelo de simulación en 3D de pilas de madera para analizar los parámetros influyentes en el coeficiente de apilado

DE MIGUEL-DÍEZ, F. ¹, TOLOSANA ESTEBAN, E. ² y CREMER, T. ¹

¹ Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde (Alemania)

² Universidad Politécnica de Madrid. ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural

Resumen

En la estimación del volumen real de madera contenido en una pila juegan un papel decisivo no solo las propiedades de la pila sino también las propiedades de las trozas. Aunque muchas de estas últimas como el diámetro, la longitud, la conicidad o la curvatura han sido ya estudiadas y son tenidas en cuenta al medir las pilas y cuantificar el volumen real de madera en numerosos países, su influencia no ha sido analizada individualmente hasta la fecha con una base estadística amplia ya que los costes de la toma de datos hubieran sido muy altos. Por este motivo con el fin de analizar las mismas se desarrolló un modelo de simulación en 3D que genera virtualmente las trozas y forma las pilas en base a datos reales o definidos arbitrariamente. La validación preliminar del modelo demostró que el mismo sobreestima de media en un 0,06% el volumen aparente de las pilas revelando por tanto una elevada precisión y su fiabilidad para determinar coeficientes de apilado y analizar sus parámetros influyentes. Los resultados del análisis mostraron que los parámetros que más influencia ejercen en los coeficientes de apilado son la longitud de la troza, el diámetro medio y la preparación de la troza, siguiendo con una influencia moderada la curvatura y la conicidad. Por último, la ovalidad tiene una influencia marginal en los coeficientes de apilado. En base a estos análisis, las guías de medición actualmente usadas en diversos países como Alemania o Suecia podrían ser adaptadas con el fin de elevar su grado de exactitud.

Palabras clave

Modelo de simulación, coeficientes de apilado, medición de madera, métodos foto-ópticos, software.

1. Introducción

La madera para uso industrial es comercializada en numerosos países de manera apilada después de la corta (HAMILTON, 1988). En este proceso de compraventa juegan dos parámetros un papel fundamental: el volumen aparente de la pila y el volumen real de madera contenido en la misma. Sin embargo, en el volumen aparente, utilizado predominantemente en la comercialización como medida de facturación, están incluidos tanto el volumen de corteza como los huecos producidos en el interior de la pila debido tanto a la forma de las trozas como a la calidad del apilado.

Debido a que los costes de adquisición de la madera en rollo suponen entre el 60 y el 85% de los costes totales de la producción (FONSECA, 2005), es preciso estimar la cantidad de madera real contenida en la pila de la manera más fiable y precisa posible. Estimaciones erróneas en el proceso de medición y adquisición pueden conllevar pérdidas económicas considerables para los agentes implicados en el proceso.

Un método rápido para estimar el volumen real contenido en la pila es la aplicación de coeficientes de apilado. Estos pueden ser determinados *in situ* (PURSER, 1999) siguiendo diferentes métodos o pueden ser estimados en trabajos de investigación para diferentes especies y tipos de madera (VON SECKENDORFF-GUDENT, 1878; RĂZVAN CÂMPU *et al.*, 2015), siendo este último método el más rápido ya que reduce la estimación del volumen real de madera a la aplicación de los mismos al volumen aparente de la pila medido previamente.

La determinación del volumen real de madera en la pila y de los coeficientes de apilado, así como el análisis de los parámetros influyentes en ambos valores ha constituido un tema de investigación que se remonta a 1765 en Alemania (VON SECKENDORFF-GUDENT, 1878). No sería hasta la segunda mitad del siglo XIX cuando se obtuvieron las primeras cifras fiables para trozas de diferentes especies y determinadas características (GRAVES, 1906). En las siguientes décadas, diferentes autores siguieron publicando estudios en los cuales nuevos parámetros eran identificados y analizados, así como nuevos coeficientes de apilado eran determinados para otras especies o revisados aquellos que ya habían sido definidos, desde SCHNUR en 1932 hasta WITKOWSKA y JODŁOWSKI en 2018.

Para tal fin, los investigadores utilizaron diferentes métodos siendo los más frecuentes el método xilométrico y el método dendrométrico. El primero consistía en sumergir las trozas en un recipiente con agua y basándose en el principio de Arquímedes, determinar el volumen de las trozas a partir del volumen de agua desplazada. El segundo método consistía en medir la longitud y los diámetros (en el medio de la troza, en los dos extremos o en estos tres puntos) y en determinar el volumen individual de cada troza en base a estas mediciones mediante las fórmulas de Huber, de Newton o de Smalian. El volumen neto de las pilas era obtenido al sumar los volúmenes individuales calculados de cada troza. Después, los coeficientes de apilado eran estimados mediante la división del volumen real de la pila entre el volumen aparente. En varios estudios el método era repetido varias veces y el coeficiente de apilado resultante era la media de todos los obtenidos.

Sin embargo, todos los métodos para la estimación del coeficiente de apilado eran empíricos y los costes ocasionados para este fin eran elevados. Esto se traducía en que tanto los coeficientes de apilado estimados, así como los resultados de los análisis de los parámetros influyentes en los mismos estaban basados en bases de datos reducidas. Además, no era posible analizar todos los parámetros de manera individual ya que aplicando los métodos descritos la influencia analizada era el resultado de correlaciones de influencias de diferentes parámetros actuando conjuntamente. Asimismo, no siempre era posible formar pilas con un determinado número de trozas que reunieran las propiedades objeto de estudio (DE MIGUEL-DÍEZ et al., 2021).

Con el fin de obtener coeficientes de apilado para cada tipo de madera y especie, analizar la influencia individual de los parámetros conforme a amplias bases estadísticas y aprovechando el alto grado de desarrollo de los modelos de simulación, se optó por el desarrollo de un modelo de simulación en 3D a cargo de “Dr. Philippe Guigue Software Artisan” en el marco del proyecto financiado por el ministerio federal alemán de agricultura y alimentación “Optimización de la cadena de suministro de madera a través del análisis, evaluación y desarrollo de los métodos de medición de la madera en rollo y procesos logísticos (HoBeOpt)”. La dirección del desarrollo del software fue asumida por la asociación alemana de la industria de la madera “Arbeitsgemeinschaft Rohholz e.V.” en estrecha colaboración con la universidad alemana para el desarrollo sostenible de Eberswalde (Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde) (DE MIGUEL-DÍEZ et al., 2021). La aplicación de este tipo de solución para tal fin fue completamente innovadora existiendo solamente dos precedentes similares: un modelo que servía para reproducir las trozas en 3D con el fin de medir el volumen de la pila (KRUGLOV y SHISKO, 2017) y otro modelo simulación en 3D para pilas de madera desarrollado en la universidad de desarrollo sostenible de Eberswalde en Alemania. Sin embargo, este último no fue validado con mediciones reales y no generaba todas las propiedades de las trozas, por ejemplo: la corteza (MIESNER, 2021).

2. Objetivos

El objetivo principal del presente estudio fue el desarrollo del modelo de simulación en 3D de pilas de madera, así como el análisis de la influencia individual de diversos parámetros en los coeficientes de apilado mediante la aplicación del modelo de simulación en 3D desarrollado. Concretamente, los parámetros que fueron analizados en este trabajo fueron: longitud, diámetro

medio, curvatura, la calidad del desramado de las trozas y la ovalidad de las trozas. Con el fin de analizar la influencia de los parámetros enumerados anteriormente en función de la especie arbórea, se tuvo en cuenta en el presente análisis las especies forestales de pino albar (*Pinus sylvestris* L.) y picea (*Picea abies* (L.) H. Karst.).

3. Metodología

3.1. Desarrollo del modelo de simulación en 3D

El modelo de simulación fue integrado en un software y desarrollado en el lenguaje de programación C# en “.Net Framework”. El modelo de simulación está basado en la plataforma para la programación de videojuegos “Unity” Software (versión 2019.4.9f1) desarrollada por “Unity” Technologies (DE MIGUEL-DÍEZ et al., 2021). Mediante esta plataforma se modelan geoméricamente las trozas proporcionando las estructuras de datos necesarias y las operaciones geométricas para tal fin, estimándose también los volúmenes. Además, su ingeniería potencia los procesos de simulación física que tienen lugar en el apilado virtual de las trozas. En el desarrollo del modelo de simulación se hizo una selección de parámetros a considerar y fueron asumidas una serie de simplificaciones que buscaban la facilitación de la recopilación de datos y que no afectaran considerablemente a la precisión del modelo.

De todos los parámetros que influyen en los coeficientes de apilado, se eligieron los siguientes: longitud de la troza, diámetros en ambos extremos y en el punto medio de la troza, conicidad, curvatura, porcentaje de trozas curvas de un determinado tipo de curvatura en la pila, ovalidad, presencia de trozas con ensanchamientos de base del tronco así como las características de tales ensanchamientos (número de salientes y dimensiones de los mimos), daños en la corteza, densidad de la madera, calidad de desramado (así como las características de los restos de ramajes en la troza: diámetro, longitud y ángulo de la rama respecto a la troza), coeficientes de rozamiento dinámico y estático entre las trozas, porcentaje de trozas apiladas en un determinado sentido, longitud mínima de la pila, ángulo medio de las caras laterales de las pilas (se asume una forma trapezoidal de la pila de madera), presencia de trozas a modo de base de la pila y calidad del apilado medida como el ángulo de desviación de las trozas respecto del plano principal de apilado y el porcentaje de trozas apiladas que presentaban esa desviación.

En el desarrollo del modelo fueron asumidas tres simplificaciones. La primera afecta al tipo de curvatura de las trozas. De todos los tipos de curvatura existentes fueron seleccionados dos en base a la frecuencia con que la que fueron observados durante la toma de datos al desarrollar del modelo de simulación: forma de arco y curvatura en la parte final de la troza. La segunda simplificación está relacionada con los daños en la corteza. Se asumió que el daño en la corteza se correspondía con una reducción proporcional del grosor de corteza introducido para cada troza individual. La tercera simplificación está relacionada con los coeficientes de rozamiento. El modelo de simulación aplica un coeficiente que es el valor medio de los coeficientes de rozamiento dinámico y estático. Debido a que aún en la actualidad no se han determinado coeficientes de rozamiento dinámicos y estáticos para tal fin en función de los parámetros introducidos: tipo de especie, presencia de corteza, etc., se asumió un valor de 0,6 en base a una amplia revisión bibliográfica y tras comprobarse que dentro de un rango entre 0,5 y 0,7 (valores considerados a partir de otros valores extraídos de varias fuentes consultadas) la variación del volumen aparente era insignificante.

3.2. Análisis de los parámetros influyentes en los coeficientes de apilado

Para la realización del análisis se midieron los parámetros requeridos por el modelo de simulación en 540 trozas de picea y 1540 trozas de pino albar. Las trozas de picea tenían una longitud comercial de 2,5 m, variando sus diámetros medios entre 9,6 cm y 36,9 cm; y las trozas de pino albar de 3 m, variando sus diámetros medios entre 7,5 cm y 44,1 cm. Las trozas fueron

preparadas en el distrito forestal de Chorin en Brandemburgo (Alemania). Los parámetros que se midieron fueron:

- la longitud de la troza. Este parámetro fue medido con una cinta métrica entre ambos extremos de la troza y expresado en metros con dos décimas.
- los diámetros de la troza en ambos extremos y en el medio de la misma. Para tal fin se utilizó una forcípula. En cada punto, se midieron dos diámetros perpendicularmente. Estos parámetros fueron medidos en milímetros.
- la curvatura de la troza. Para tal fin se puso una tabla entre los extremos de la troza y se midió la distancia entre la tabla y el punto de la troza donde la curvatura era más prominente con un metro de carpintero (distancia conocida como la flecha de la curva). Este parámetro se calculó dividiendo esta distancia por la longitud de la troza expresándose en milímetros por metro.
- el grosor de la corteza. Este parámetro fue medido con una regla en ambos extremos de la troza y en varios puntos en cada extremo en milímetros, calculándose el valor de medio de las medidas tomadas.

En base a esas medidas, la conicidad y la ovalidad fueron calculadas. La conicidad de la troza fue estimada de la siguiente manera: primero, calculando la media aritmética de los dos diámetros medidos perpendicularmente en cada extremo de la troza, segundo, restando el valor medio del diámetro del extremo más delgado al valor medio del extremo más grueso. Finalmente, se dividió esta diferencia por la longitud de la troza, expresándose la conicidad en milímetros por metro. La ovalidad se expresó mediante un factor, que variaba entre 0 y 1, calculado dividiendo el diámetro menor entre el diámetro mayor en cada punto de la troza donde fue medido (en los dos extremos y en el medio de la troza) y calculando el valor medio de los tres. El valor 1 en este factor corresponde a trozas generadas virtualmente perfectamente redondas, mientras que todos los demás valores se corresponden a la generación trozas ovales en mayor o menor grado.

Una vez realizadas las mediciones se procedió a preparar las diferentes bases de datos para analizar cada parámetro. Cada base de datos estaba compuesta por 300 trozas. La selección de las trozas fue aleatoria y atendiendo a los valores de cada parámetro. Por ejemplo, para analizar la influencia del diámetro medio se clasificaron todas las trozas en cinco clases diamétricas y se prepararon sus correspondientes cinco bases de datos. En cada base de datos, había 300 trozas cuyos diámetros medios estaban comprendidos en la primera base de datos, entre 10,0 y 14,9 cm, en la segunda, entre 15,0 y 19,9 cm, en la tercera, entre 20,0 y 24,9 cm, en la cuarta, entre 25,0 y 29,9 cm y en la quinta, entre 30,0 y 34,9 cm. Los diámetros mayores de 35,0 cm y menores de 10,0 cm no fueron considerados en este estudio debido a la insuficiencia en número de datos reales medidos para preparar bases de datos con 300 trozas. De esta manera, fue posible analizar la variación de los coeficientes de apilado cuando el diámetro medio es incrementado o reducido. Con el propósito de analizar la calidad de desramado o preparado de la troza, se preparó una misma base de datos y se modificó la calidad de desramado en cada simulación. En estas simulaciones la calidad de desramado varió desde 0% a 100%.

En el caso de la longitud de la troza, debido a la imposibilidad de medir trozas con diferentes longitudes comerciales, por ejemplo: 1 m, 2 m o 3 m; se modificó de manera arbitraria las longitudes de las trozas al introducir los parámetros en el modelo de simulación. De esta manera fue posible generar trozas virtualmente con diferentes longitudes sin alterar los otros parámetros. La misma limitación presentaba el factor ovalidad. Por este motivo, se modificó el factor ovalidad en todas las trozas para que estas fueran generadas virtualmente tanto como fueron medidas (ovales y/o redondas), como perfectamente redondas.

En total se realizaron 38 simulaciones. En cada simulación se modelaron 150 pilas. Esto significa que los resultados del presente análisis se basaron en 5700 pilas de madera generadas virtualmente.

4. Resultados

El modelo de simulación en 3D obtenido integrado en un software presenta una interfaz principal en alemán desde la cual se puede acceder a todos los módulos que lo componen: 1) generador de bases de datos de trozas definidas arbitrariamente por el usuario (Generator), 2) introducción de bases de datos con mediciones reales de trozas y donde se introducen de igual manera los parámetros de las pilas a simular (longitud de la pila, densidad de la madera, etc.) (Eingabe), 3) simulación de las pilas, donde se introduce el número de pilas que deben ser simuladas y desde donde se exportan los resultados (Simulation), 4) opciones (Einstellungen), 5) plantilla de base de datos compatible con el software (Eingabevorlage) y 6) ayuda (Hilfe) (Figura 1).

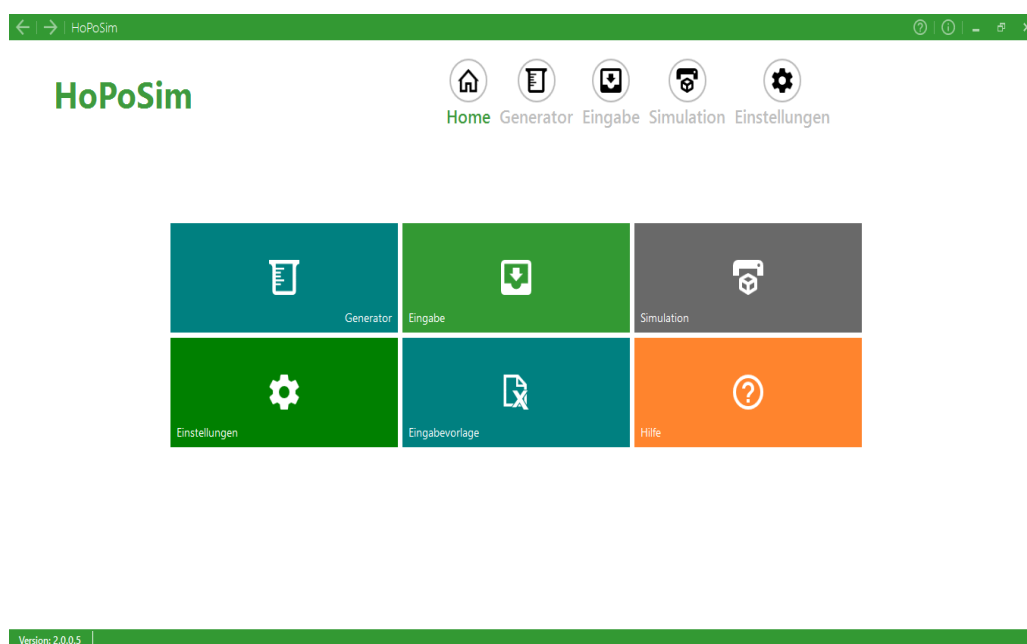


Figura 1. Interfaz principal del modelo de simulación.

El modelo de simulación genera virtualmente las trozas en función de los parámetros introducidos y las apila teniendo en cuenta además las propiedades físicas de las mismas. El modelo de simulación simula el proceso de apilado dejando caer filas de trozas encima de las anteriores como se observa en la figura 2. La simulación es realizada cuidando hasta el último detalle como son los restos de desramado, los ensanchamientos de base de los troncos, así como la presencia o no de corteza en la troza, que en caso de carecer de la misma es representado por un color más claro.

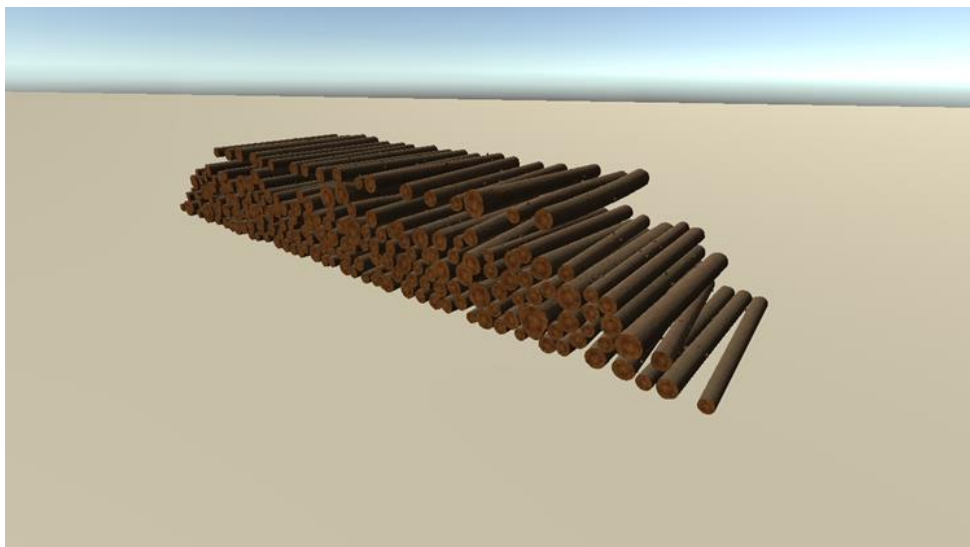


Figura 2. Simulación del proceso de apilado.

Los resultados del modelo de simulación son el volumen aparente de la pila, el volumen real, el coeficiente de apilado y la proporción del volumen de corteza en la pila. El modelo de simulación reproduce fielmente tres métodos de medición del volumen aparente. El primer método consiste en el método por secciones descrito en el acuerdo marco alemán para la comercialización de la madera en rollo como se observa en la figura 3 (secciones en amarillo y naranja). El segundo método reproducido corresponde a los métodos foto-ópticos (línea naranja delimitante de la cara de la pila en la figura 3). El tercer método es el método de la línea poligonal que consiste en delimitar el área frontal y posterior de la pila con una línea poligonal, calcular el área contenida dentro de ella y multiplicar esta por la longitud comercial de las trozas. Los tres métodos, así como las pilas simuladas pueden ser visualizados a lo largo de la simulación y una vez el modelo haya simulado todas las pilas de madera (Figura 3).

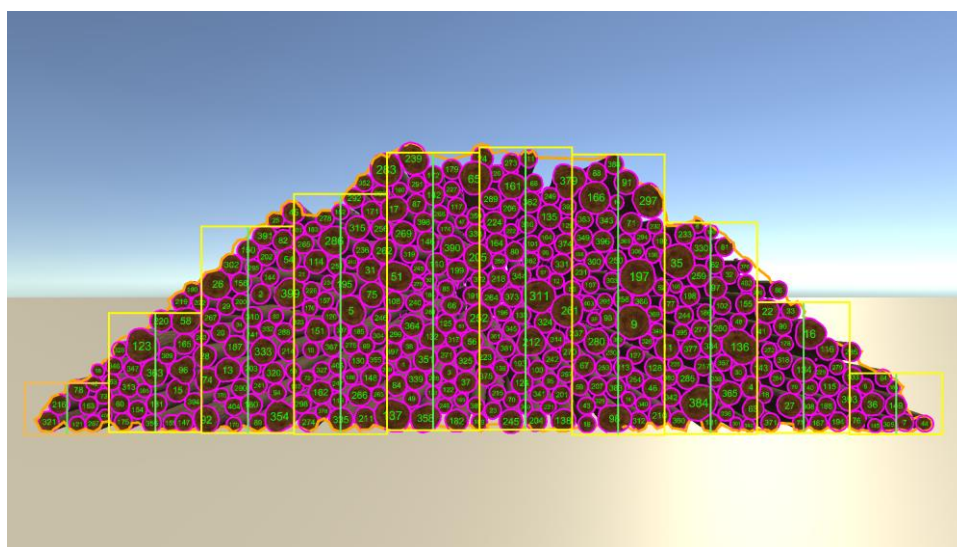


Figura 3. Pila simulada y reproducción de los métodos de medición foto-ópticos y por secciones.

Este modelo de simulación fue evaluado preliminarmente en base a mediciones reales. Para tal fin, se midieron los parámetros requeridos para la simulación en 405 trozas de picea que fueron apiladas *a posteriori* 10 veces. El volumen de las trozas fue medido mediante un xilómetro. Las mediciones de

los volúmenes aparentes y el volumen real calculado fueron comparadas con las obtenidas con el modelo de simulación. La exactitud del modelo fue evaluada calculando el Mean Bias Error (MBE). Los resultados de esta evaluación revelaron una alta exactitud del modelo de simulación. El MBE medio obtenido fue de $0,02 \text{ m}^3$ (0,06%) variando entre $-0,4 \text{ m}^3$ y $0,5 \text{ m}^3$. El resultado positivo del valor medio del MBE significa que el modelo de simulación sobreestima el volumen aparente en $0,02 \text{ m}^3$ de media (DE MIGUEL-DÍEZ et al., 2021).

Los resultados de las simulaciones mostraron diferentes tendencias y magnitudes en función del factor analizado (Figura 4). En el caso de la longitud de la troza, para una variación de 3 m a 1 m de longitud se observó un incremento de los coeficientes de apilado medios tanto en el caso de la picea (Figura 4A) como en el pino albar (Figura 4B). En el caso de la picea, los coeficientes de apilado medios resultantes para las longitudes simuladas de 3 m y 1 m fueron 0,62 y 0,68 respectivamente; y 0,49 y 0,58 respectivamente para pino albar. Esto supone un incremento relativo de 7,9 % en el caso de la picea y un 18,2 % en el caso del pino albar. En el análisis del diámetro medio se aprecia un incremento de los coeficientes de apilado medios al elevarse el diámetro medido de las trozas. En este caso, los coeficientes de apilado medios entre los clases diamétricas más pequeñas y las más grandes variaron de 0,56 a 0,66 en el caso de la picea (Figura 4C) y de 0,50 a 0,65 en el caso del pino albar (Figura 4D). Esto conlleva por tanto una variación de un 17,8% en la picea que alcanza en el caso del pino albar un 32%. El análisis de la influencia de la curvatura en los coeficientes de apilado reveló que su efecto es considerable. Los coeficientes de apilado medios entre trozas rectas y con curvatura alta variaron un 12,1% en el caso de la picea (Figura 4E) y un 12,4 % en el caso del pino albar (Figura 4F). Al analizar la calidad de desramado o preparado de la troza se cuantificó una variación de los coeficientes de apilado medios entre una calidad de desramado muy mala y una muy buena de 7,9 % para picea (Figura 4G) y de 28,9 % para pino albar (Figura 4H). Finalmente, la ovalidad presentó una variación marginal de los coeficientes de apilado medios entre las trozas ovales y las perfectamente redondas. En el caso de la picea la variación fue de 1,6% (Figura 4I) y en el caso del pino albar se cuantificó una variación del 2% (Figura 4J).

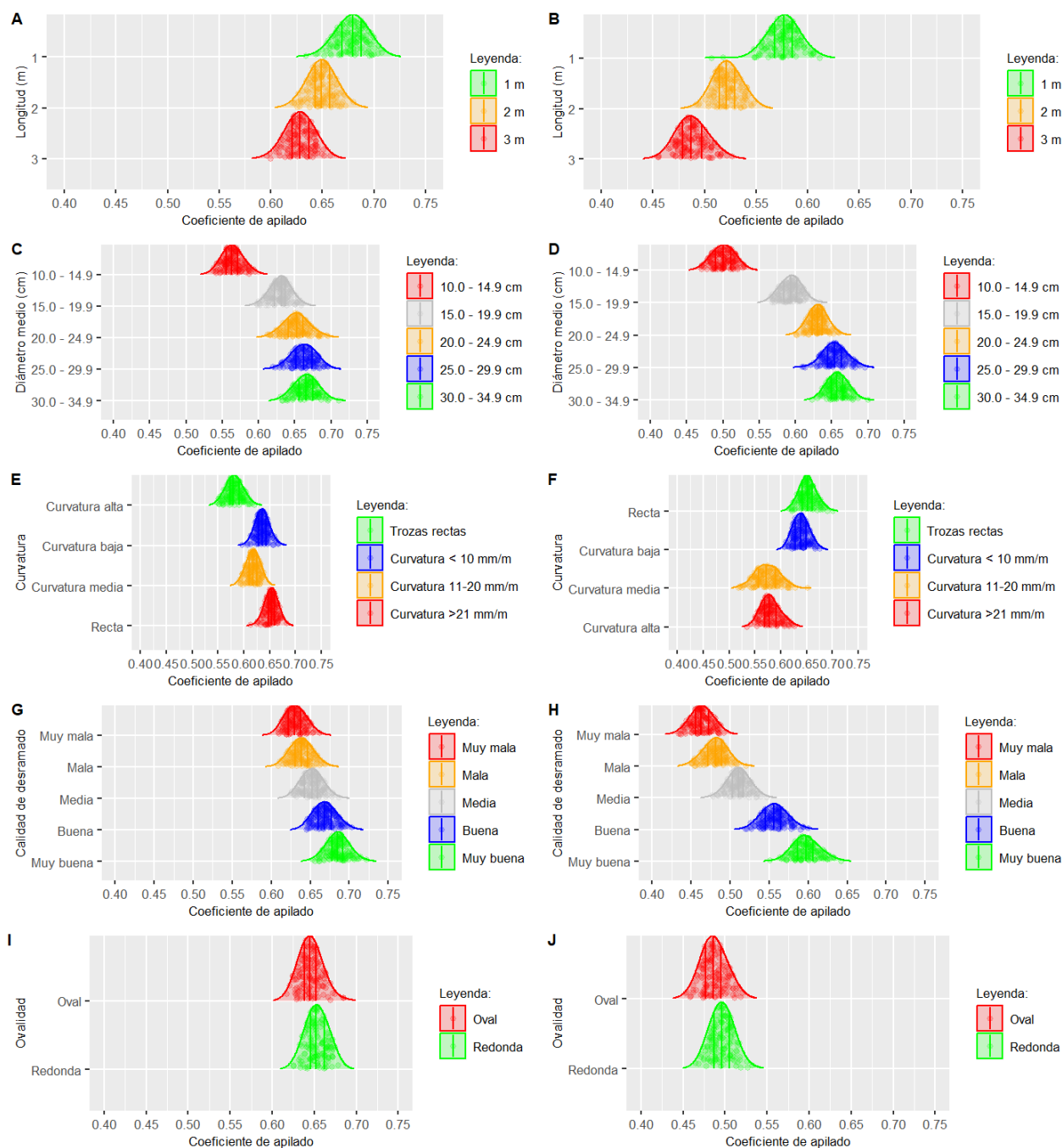


Figura 4. Diagramas de densidad con los coeficientes de apilado resultantes en la simulación para picea (columna izquierda) y pino albar (columna derecha).

5. Discusión

El modelo de simulación en 3D desarrollado puede ser considerado como una herramienta altamente útil en el campo de investigación de la medición de la madera en rollo. El mismo ofrece un amplio espectro de posibilidades desde la determinación de coeficientes de apilado para diferentes tipos de madera y especies forestales, pasando por el análisis de los diferentes métodos de medición que reproduce hasta el análisis de un amplio número de parámetros influyentes en los coeficientes de apilado tanto en lo referente a las trozas como en lo referente a la calidad del apilado.

Sin embargo, el modelo de simulación tiene una serie de limitaciones como la incapacidad de reproducir virtualmente algunos parámetros como tipos de curvatura poco frecuentes o ensanchamientos puntuales en las trozas (DE MIGUEL-DÍEZ et al., 2021). Teniendo en cuenta estas limitaciones, el modelo de simulación podría ser mejorado. Otra posibilidad de mejora sería la incorporación de otros métodos de medición del volumen aparente.

Respecto a los resultados de los análisis de los parámetros, cabe destacar que los mismos refuerzan los estudios de investigación previos y los precisan en base a una base estadística mucho más amplia que con la que fueron realizados.

La influencia de la longitud de la troza refleja una tendencia creciente de los coeficientes de apilado a medida que la longitud se reduce. Esta tendencia deducida de los resultados de la simulación coincide con los resultados de estudios de investigación anteriores (VON SECKENDORFF-GUDENT, 1878; RĂZVAN CÂMPU et al., 2015) y guías de medición de la madera actuales como el acuerdo marco alemán para el comercio de la madera en rollo (RVR, 2020). Este efecto se debe a la influencia de otros parámetros como la curvatura o la calidad de desramado o preparación de la troza. Estos parámetros producen huecos en el interior de la pila que se ven incrementados al elevarse la longitud de la troza.

Respecto al diámetro medio, los resultados de la simulación revelaron que los coeficientes de apilado medios disminuyeron al reducirse el diámetro medio de las trozas. Estos resultados están en línea con estudios de investigación previos (KEEPERS, 1945). Se asume que la variación obtenida es debida a dos razones: el volumen de corteza en la pila y la curvatura de las trozas. El volumen de corteza en la pila es mayor cuando el diámetro medio de las trozas es bajo (REINHOLD 1951; VORREITER 1954). Igualmente, cuando el diámetro de las trozas es bajo, estas suelen presentar una curvatura más prominente (REINHOLD, 1951; BÄUCKER et al., 2014) ya que normalmente son trozas provenientes de las partes más altas de los árboles.

La curvatura de las trozas ejerce una alta influencia en los coeficientes de apilado ya que las trozas curvas ocupan un mayor espacio en la pila que las rectas ocasionando más espacios vacíos en su interior (HAMILTON, 1988; PURSER, 1999; DE MIGUEL-DÍEZ et al., 2021).

Los resultados de la simulación indicaron el considerable efecto que tiene la preparación de la troza o calidad del desramado en los coeficientes de apilado. Cuando la preparación es mala, quedan muchas ramas todavía en la troza, que producen, por tanto, una considerable cantidad de espacios vacíos de menor o mayor tamaño dentro de la pila, obteniéndose en consecuencia coeficientes de apilado bajos. Los resultados de las simulaciones coinciden con estudios de investigación previos (ZON, 1903; BÄUCKER et al., 2014), así como con guías actuales para la medición de la madera en diferentes países como Irlanda (PURSER, 1999) o el Reino Unido (HAMILTON, 1988). En teoría, deberían estar todas las trozas siempre perfectamente preparadas, pero en la práctica no es ni ha sido así. Referencias de principios y mediados del siglo XX ya indicaban mala praxis de los rematantes (GRAVES, 1906) con el fin de aumentar malintencionadamente el volumen aparente de las pilas al no desramar correctamente las trozas.

El factor ovalidad apenas reflejó una influencia modesta en los coeficientes de apilado. Esto fue debido a que las trozas medidas eran casi perfectamente redondas. Estos resultados coinciden con el bajo factor de correlación determinado por HEINZMAN y BARBU en su estudio de investigación (2017).

Cabe destacar, la constante diferencia en la magnitud de los efectos de cada parámetro en los coeficientes de apilado medios en función de la especie forestal. Tal y como mostraron los resultados,

cada parámetro afectó de distinta manera a las pilas formadas por picea y por pino albar y refuerzan las conclusiones de investigaciones previas (VON SECKENDORFF-GUDENT, 1878; ZON, 1903).

6. Conclusiones

El modelo de simulación en 3D fue desarrollado con éxito. La validación preliminar del mismo demostró su alta exactitud en la simulación de las pilas de madera y en la reproducción fiel de los métodos de medición implementados. La sobreestimación resultante en la validación preliminar resultó insignificante. En el presente estudio pudo comprobarse que el uso del modelo de simulación supone una vía factible y eficiente para abordar este tema de investigación que ocupa a las ciencias forestales desde la segunda mitad del siglo XVIII.

Respecto al análisis de los parámetros analizados, puede concluirse que aquellos que ejercen una influencia más considerable sobre los coeficientes de apilado son el diámetro medio, la calidad de desramado o preparación de la troza, siguiendo la longitud de la troza y la curvatura de la misma. Por el contrario, la influencia de la ovalidad fue, de acuerdo con los resultados de las simulaciones, residual.

Finalmente, cabe destacar dos importantes puntos:

1. La influencia de cada parámetro es diferente en función de la especie forestal.
2. La influencia individual de un determinado parámetro es a su vez influenciada por otros parámetros, por ejemplo: longitud y curvatura.

7. Agradecimientos

Este estudio se llevó a cabo en el marco del proyecto "HoBeOpt", que fue financiado a través de Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) (Alemania) por el Ministerio Federal de Alimentación y Agricultura (BMEL) (Número de referencia de financiación: 22008518).

These materials are not sponsored by or affiliated with Unity Technologies or its affiliates. "Unity" is a trademark or registered trademark of Unity Technologies or its affiliates in the U.S. and elsewhere.

8. Bibliografía

BÄUCKER, E.; KEHRER-LIEBMANN, J.; GÜNTHER, B.; BUES, C.T. Unterschiedliche Festgehalte in Poltern verunsichern. *Holz-Zentralblatt* 2014, 140, 75–77.

DE MIGUEL-DÍEZ, F.; TOLOSANA-ESTEBAN, E.; PURFÜRST, T.; CREMER, T. Analysis of the influence that parameters crookedness and taper have on stack volume by using a 3D-simulation model of wood stacks. *Forests* 2021, 12, 238.

FONSECA, M.A. *The Measurement of Roundwood: Methodologies and Conversion Ratios*; CABI Publishing: Oxfordshire, UK, 2005;

HAMILTON, G.J. *Forest Mensuration Handbook*; Forestry Commission Booklet No. 39: London, UK, 1988; pp. 27–35.

HEINZMANN, B.; BARBU, M.C. Effect of mid-diameter and log-parameters on the conversion factor of cubic measure to solid measure concerning industrial timber. *Pro Ligno* 2017, 13, 39–44.

GRAVES, H.S. *Forest Mensuration*; John Wiley and Sons, Inc.: New York, NY, USA, 1906; p. 103.

KEEPERS, C.H. A new method of measuring the actual volume of wood in stacks. *Journal of Forestry* 1945, 43, 16–22.

KRUGLOV, A.; SHISHKO, E. Log pile measurement through 3D modeling. En *2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Barcelona, España, 05–07 Jul. 2017; IEEE, 2017; pp 263–266, ISBN 978-1-5090-3982-1.

MIESNER, T. Influence of Model Parameters to a 3D Roundwood Pile Simulation. M. Sc. Thesis; Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, Eberswalde, Alemania, 2021.

PURSER, P. *Timber Measurement Manual. Standard Procedures for the Measurement of Round Timber for Sale Purposes in Ireland*; COFORD, The Council for Forest Research and Development: Dublin, Ireland, 1999;

RĂZVAN CÂMPU, V.; DUMITRACHE, R.; BORZ, S.A.; TIMOFTE, A.I. The impact of log length on the conversion factor of stacked wood to solid content. *Wood Res. Slovakia* 2015, 60, 503–518

Reinhold, M. Die Inhaltzahlen von Schichtnutzholz. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 1951, 70, 566–577.

RVR. RAHMENVEREINBARUNG FÜR DEN ROHHOLZHANDEL IN DEUTSCHLAND (RVR); Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR): Gülzow-Prüzen, Germany, 2020. Disponible en: <https://www.rvr-deutschland.de/struktur.php?id=47>.

SCHNUR, G.L. Converting factors for some stacked cords. *J. For.* 1932, 30, 814–820

SDC. Measurement of roundwood stacks: SDC's instructions for timber measurement. Disponible en: <https://www.sdc.se/admin/Filer/Nya%20m%C3%A4tningsinstruktioner%202014/SDCs%20instructions%20-%20Measurement%20of%20roundwood%20stacks.pdf>.

VON SECKENDORFF-GUDENT, A. 1878. Untersuchungen über den Festgehalt der Raummasse und das Gewicht des Hölzes im frischgefällten Zustande. *Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Wien*. 1: 1–43.

VORREITER L. 1954. Mess- und Rechnungswerte für Rundhölzer. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*. 73:179–184.

WITKOWSKA, J.; JODŁOWSKI, K. Determining the conversion factors for selected lengths of medium-sized pine and spruce wood in the S2 group. *Forest Research Papers* 2018, 79, 69–76, doi:10.2478/frp-2018-0008.

ZON, R.G. Factors Influencing the Volume of Solid Wood in the Cord. *J. For.* 1903, 1, 126–133, doi:10.1093/jof/1.4.126.