



7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-569

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

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Desarrollo de una aplicación basada en la Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR) para la identificación de la especie y el origen geográfico de la madera

DE LUQUE, M.¹; ÁLVAREZ SAN MILLÁN, M.²; PÉREZ, S.¹; SIERRA, V.²; LUQUE, L.¹ y GARCÍA, E.²

¹ Gestión Forestal Responsable, S.L. (GEA Forestal). c/ Tercio, 20, Bajo Der 28019 Madrid, Spain, info@geaforestal.com

² Spectrapply, Polígono Industrial Puente Nora, Calle E, 2, 2ª planta 33420 Lugones, Asturias, Spain, www.spectrapply.com

Resumen:

Acabar con el comercio de madera de procedencia ilegal es un asunto prioritario para el sector forestal, sin embargo, los métodos de control existentes son fundamentalmente documentales y por tanto susceptibles de falsificación y fraude, por ello, se hace necesaria la introducción de nuevas tecnologías que garanticen la procedencia legal de la madera. En el presente trabajo se ha analizado la capacidad de la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIR) para discriminar madera de dos especies comerciales en el sector maderero de nuestro país: *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*, procedentes de tres localidades geográficas del noroeste de España (Asturias, A Coruña y Lugo). Los resultados muestran una discriminación adecuada en función de la especie y/o del origen, alcanzando porcentajes de identificación correcta superiores al 80 %. Además estos resultados muestran que tanto el tipo de sección como el tiempo transcurrido desde la tala hasta la recogida espectral influyen considerablemente en los resultados y son factores a tener en cuenta a la hora de desarrollar aplicaciones basadas en esta tecnología. Con estos resultados podemos asumir que la tecnología NIR podría ser de gran utilidad para mejorar la trazabilidad y cumplir con las normativas europeas sobre el comercio de la madera (EUTR).

Palabras clave:

NIR, comercio ilegal, EUTR

1. Introducción y objetivos

La madera proveniente de la tala ilegal supone en la Unión Europea cerca del 15% del total importado (WWF, 2004; FOREST TRENDS, 2013; HOARE, 2015). En el caso de algunos países tropicales, el riesgo de esta madera ilegal alcanza un 90% como es el caso de la R. D. Congo o Camboya, pero este tráfico ilegal también afecta por ejemplo a otros lugares como el este de Rusia, de quien importamos un 16% de la madera en rollo y aserrada, donde se estima que entre el 25 y el 50% de la madera que se exporta es ilegal (SMIRNOV et al., 2013). La tala ilegal causa importantes daños económicos, sociales y ambientales. Se estiman unas pérdidas económicas globales de alrededor de 10.000 M\$ anuales por este comercio ilegal a los que hay que añadir otros 5.000 M\$ por pérdidas en recaudación de impuestos (WORLD BANK, 2006). Según Interpol y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, el comercio de madera ilegal genera entre de 20 y 30.000 M€ al año (WORLD BANK, 2002). Este dinero queda en manos de mafias y responsables corruptos y llega a financiar conflictos armados (GLOBAL WITNESS, 2015).

El método de control sobre el origen de la madera es, actualmente, documental, por medio de la recepción de permisos de tala y exportación. El problema es que estos documentos se obtienen o falsifican fácilmente en los países de origen debido a la corrupción local imperante y la falta de control institucional (CALLISTER, 1999). Hoy en día, forzados por el aumento de control en Europa (Normativa EUTR en 2010) y Estados Unidos (modificación de la Lacey Act en 2008), los métodos de falsificación pasan principalmente por el denominado “lavado de madera”, que consiste en la mezcla de madera legal e ilegal, llegando a aumentar el volumen permitido en las concesiones entre un 300 y un 3000 %, así como la exportación y contrabando a terceros países donde se expiden nuevos certificados (NELLEMANN-INTERPOL, 2012).

Por todo ello se está trabajando en la búsqueda de métodos que permitan la trazabilidad de la madera equilibrando la sencillez en su aplicación y la inviolabilidad de la información. Actualmente, se establecen sistemas de diligencia debida, tanto propios como a través de modelos voluntarios de certificación forestal (los más extendidos son FSC® y PEFC™) basados en la recopilación documental y empleando etiquetados, RFIDs (Radio Frequency Identification) o chips. Aunque estos métodos muestran cierta eficacia no están exentos de ser manipulados, por lo que actualmente aumenta el interés en el desarrollo de métodos tecnológicos analíticos que resulten independientes de la documentación y los etiquetados. Algunos de éstos métodos son el análisis de ADN, de los isótopos estables y los análisis histológicos que, aunque muy eficaces, resultan lentos y costosos, ya que requieren la intervención de especialistas y sofisticados equipos de laboratorio, por lo que la mayoría de las empresas no pueden permitírselo.

Una alternativa novedosa, es el uso de técnicas físicas como la espectroscopia del Infrarrojo Cercano (NIRS, Near InfraRed Spectroscopy) como método de control del origen geográfico de la madera, ya que ésta se postula como una herramienta con gran potencial en la detección de fraudes. La espectroscopía NIR analiza la absorción o la transmisión de fotones (luz) en el rango del espectro electromagnético de la radiación infrarroja cercana, desde 780 a 2500 nm. En función de la composición química y la estructura física de cada material analizado se obtendrá un espectro de absorbancia específico que se comportará como la “huella dactilar” de cada producto analizado. Existen diversas aplicaciones industriales, científicas y médicas del NIR que se utilizan desde hace décadas siendo ésta una metodología común en las industrias agroalimentaria y farmacéutica debido a que se trata de una tecnología rápida, precisa, de bajo coste relativo y que en la mayoría de los casos no requiere tratamiento previo de la muestra por lo que resulta de sencilla aplicación (PASQUINI, 2003).

Aunque las referencias no son tan abundantes como en otros campos, se sabe que la aplicación del NIR a la madera (y también al corcho) aporta información no sólo química (humedad, contenido en lignina, contenido extractivo, azúcares etc..), sino también física y mecánica del material (rigidez, densidad, etc..). Para mayor información acerca de estas aplicaciones se puede consultar los números especiales dedicados a la madera y derivados de la revista *Journal of Near Infrared Spectroscopy* de 2010 y 2011 y otras revisiones recientes como la realizada por TSUCHIKAWA & KOBORI (2015). En la última década se ha descubierto que los espectros NIR también contienen información sobre el origen geográfico de la madera ya que, de alguna manera, factores locales como el tipo de suelo, las condiciones climáticas, los tratamientos selvícolas o las características geográficas condicionan los fenotipos de los árboles y estas ligeras variaciones estructurales quedan reflejadas en la madera y en consecuencia en los espectros NIR resultantes (SANDAK *et al.*, 2010, 2011, 2012, 2014; PRADES LÓPEZ *et al.*, 2013; BERGO *et al.*, 2016; DA SILVA *et al.*, 2016). Esta cualidad ha llevado a algunos investigadores a proponer el NIR como un método potencial para luchar contra la tala ilegal (SANDAK *et al.*, 2014; DORMONTT *et al.*, 2015).

En este contexto, el objetivo general planteado en este trabajo es: contrastar la capacidad de la tecnología NIR para discriminar en base a la especie y al origen geográfico muestras de madera. Este objetivo global comprende los siguientes objetivos parciales: definir un método adecuado de recolección de muestras y toma espectral *in situ* (en aserraderos), estudiando la influencia del tipo de sección y del tiempo de exposición a la intemperie de la madera y conocer la capacidad de discriminación de muestras en función de la especie y del origen a pequeña escala geográfica, utilizando dos especies comerciales habituales, cuyas zonas de producción distan un radio de menos de 100 Km.

2. Metodología

Se recogieron muestras de madera de 2 especies de pino: *Pinus pinaster ssp. Atlantica* comúnmente conocida como Pino marítimo y *Pinus radiata*. Las muestras se recogieron en 3 aserraderos distintos, uno en el Principado de Asturias (La Caridad) y dos en Galicia: Lugo (Alfoz)

y A Coruña (cercañas de Bendrade). Estos tres aserraderos se surten de árboles provenientes de plantaciones situadas a menos de 25 Km a la redonda.

Se trabajó con dos tipos distintos de muestras de madera en función del tipo de corte: muestras de secciones transversales de ambas especies y secciones tangenciales solo de la especie *P. pinaster*. El número de muestras analizadas por cada combinación “especie x origen” se encuentra en la Tabla 1.

Tabla 1. Número de ejemplares muestreados en las distintas localidades, especies y secciones.

Localidad	Asturias		Lugo		A Coruña
	Transversal	Tangencial	Transversal	Tangencial	Transversal
<i>P. pinaster</i>	30	20	30	20	30
<i>P. radiata</i>	30	20	30	0	0

Además como parte del experimento, se tomaron también muestras de secciones transversales de 20 ejemplares de *P. pinaster* de A Coruña que llevaban más tiempo expuestas a la intemperie (“secas”) para comprobar si existían diferencias con respecto a las más recientes (“frescas”).

El equipo utilizado para la recogida espectral fue un espectrofotómetro comercial portátil modelo Microphazir (Thermo Scientific) que mide en absorbancia de 1600 a 2400 nm. En cada muestra individual se tomaron un total de 5 espectros (20 scans/espectro) cubriendo bien toda la superficie de la muestra. Las medidas fueron tomadas en la zona de albura de la madera evitando el duramen y áreas con un exceso de resina o suciedad. En total se recogieron 1.150 espectros que fueron analizados, depurados de espurios y promediados de modo que finalmente se obtuvo un espectro promedio por muestra analizada. Con esta población de datos se procedió a realizar en primer lugar análisis exploratorios mediante Análisis de Componentes Principales (PCA) de los datos espectrales en bruto (tal y como son recogidos) o tras realizar diversos tratamientos matemáticos como SNV, Derivadas Savitzky-Golay de primer y segundo orden, transformaciones MSC y combinaciones de estos, para eliminar ruido, efectos de dispersión y solapamientos de bandas de absorción.

Posteriormente se procedió a realizar modelos de clasificación supervisada en base a la especie y el origen, utilizando distintos algoritmos tales como Análisis discriminante lineal (LDA), Análisis Discriminante mediante regresiones por mínimos cuadrados parciales (PLS-DA) y Modelado suave independiente por analogía de clases (del inglés Soft Independent Modelling of Class Analogy) (SIMCA). Para ello la población de datos inicial se dividió en dos: un conjunto de datos que componía la población de calibración, con la que se realizaron los modelos de clasificación, y una población de Validación con la que se comprobó la calidad de los modelos generados mediante validación interna (Ver tablas 3 y 6). Todo el desarrollo quimiométrico se realizó utilizando el software comercial de análisis multivariante Unscrambler vs 10.4 (CAMO).

3. Resultados

3.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO.

La Figura 1A muestra los espectros brutos de las distintas secciones de madera analizadas (transversal vs tangencial) y se puede observar que existen diferencias en la intensidad de la absorbancia, siendo mayor la de las secciones transversales. Tras realizar un análisis exploratorio mediante PCA con todas las muestras recogidas en el estudio se puede ver que el agrupamiento de los distintos tipos de muestras era evidente (Figura 1B), mostrándose tres grupos: secciones transversales (círculo rojo), secciones tangenciales (cuadrado azul) y un tercer grupo (triángulo verde) formado por las muestras de secciones transversales de *P. pinaster* que llevaban más tiempo expuestas al aire tras su corta (“secas”).

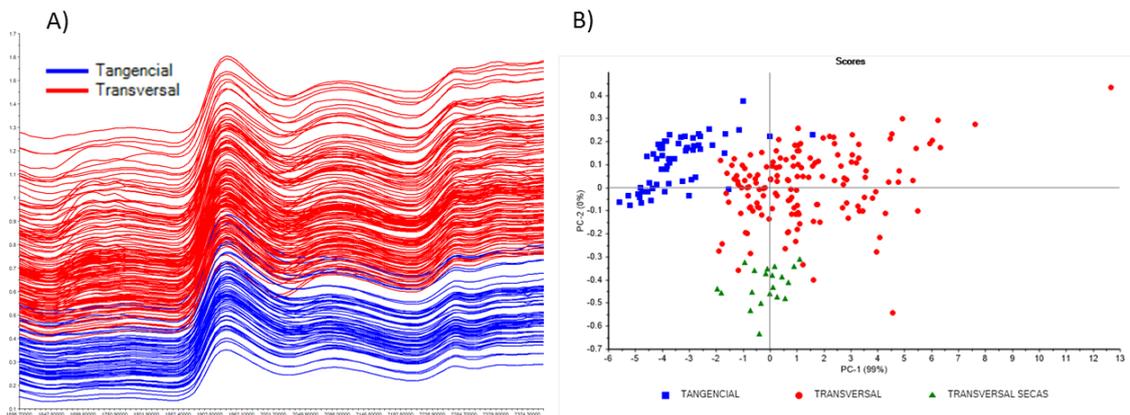


Figura 1. A) Gráfico con los espectros promedio de absorbancia brutos de las distintas muestras analizadas. B) Gráfico de scores del PC de las distintas secciones analizadas: secciones tangenciales (azul), secciones transversales “frescas” (rojo) y secciones transversales “secas” (verde).

Una vez demostrada la influencia del tipo de sección sobre los espectros, se realizaron PCAs independientes para cada tipo de sección (Figura 2) donde se pueden observar agrupamientos entre las muestras de las distintas especies y orígenes analizados (Figura 2 y Figura 3), siendo más evidente la separación grupal en el caso de las secciones tangenciales que en las transversales.

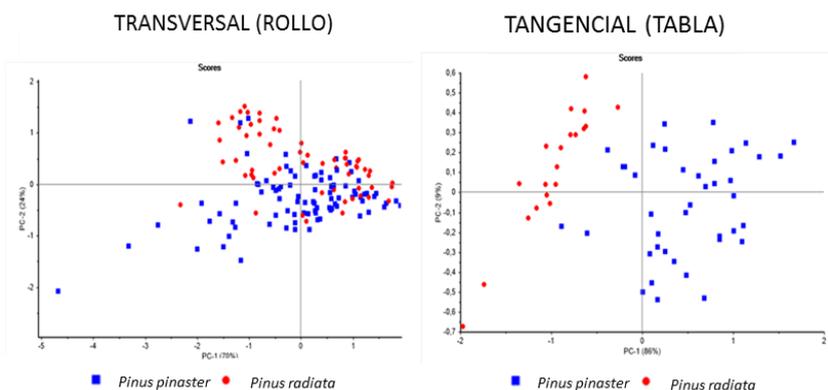


Figura 2. Gráficos de scores (2D) de los PCA que muestran en los cortes Transversal (izda) y Tangencial (dcha) los agrupamientos de las muestras en función de la Especie (*P. pinaster* vs *P. radiata*)

Además, si estudiamos lo que ocurre en el caso de las secciones transversales dentro de cada especie de pino por separado, se observa que el agrupamiento en función del origen es mucho más claro en el caso de *P. radiata* que en el de *P. pinaster* (Figura 3).

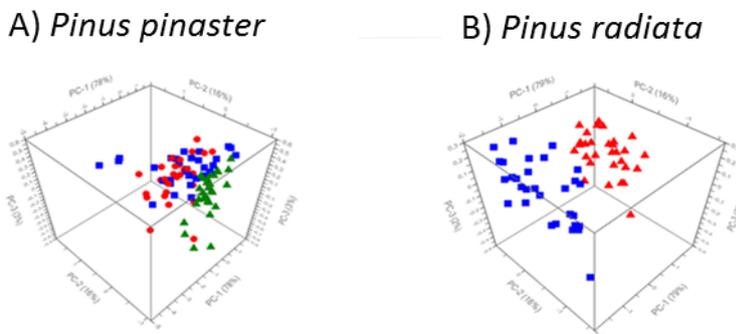


Figura 3. Gráficos de scores 3D de los PCA de los cortes transversales que muestran para cada especie por separado: los agrupamientos en cuanto al origen geográfico (Asturias, Lugo y Foz).

Teniendo en cuenta las diferencias observadas a nivel espectral entre los distintos tipos de sección, se decidió trabajar por separado con las poblaciones de muestras en base al tipo de sección (tangencial vs transversal) y realizar modelos de clasificación independientes para la especie y para el origen.

3.2. MODELOS DE CLASIFICACIÓN EN BASE A LA ESPECIE:

La tabla 3 muestra la división de datos para el estudio por especies en población de calibración y validación.

Tabla 3. Muestras de la población de calibración y de validación para los modelos de clasificación por especie.

	TRANSVERSAL (ROLLO)		TANGENCIAL (TABLA)	
	CAL	VAL	CAL	VAL
<i>Pinus pinaster</i>	75	15	32	8
<i>Pinus radiata</i>	50	10	16	4
Total	125	25	48	12

Con la población de datos de calibración y tras aplicar distintos tratamientos matemáticos a los espectros se obtienen los resultados que se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje promedio de acierto en clasificación de los distintos tipos de modelos generados para la discriminación a nivel de especie de muestras de secciones transversales y tangenciales.

DISCRIMINACIÓN ESPECIES	LDA	PLS-DA	SIMCA
TRANSVERSAL (TRONCO)	83.5%	92%	54%
TANGENCIAL (TABLA)	94%	94%	92%

En el caso de los modelos generados mediante LDA, los mejores resultados para la clasificación de las muestras de corte transversal se obtuvieron tras aplicar SNV consiguiendo una clasificación correcta del 87% de las muestras de validación de la especie *P. pinaster* y un acierto del 80% de las de *P. radiata* (en total un 83.5% de acierto). En el caso de las muestras de corte transversal los resultados en validación son ligeramente superiores tras aplicar una derivada Savitzky-Golay de primer orden (1,4,4,1) con un acierto promedio del 94% (87.5% de clasificación correcta para *P. pinaster* y del 100% para las de *P. radiata*). Los modelos generados por PLS-DA mostraron unos coeficientes de determinación de calibración y validación cruzada superiores a 0.77 para los cortes transversales y en los cortes tangenciales superiores a 0.9 (Tabla 5).

Tabla 5. Estadísticos de calibración y validación cruzada del modelo PLS-DA.

<i>P. pinaster</i> vs. <i>P. radiata</i>	N	Trat.	Fact.	RMSEC	R ²	RMSECV	r ²
Transversal (Rollo)	125	NONE	14	0.168	0.881	0.233	0.777
Tangencial (Tabla)	48	SNV	9	0.078	0.972	0.146	0.907

N: número de muestras que participan en la calibración. Trat: Tratamiento matemático. Fact: Número óptimo de factores. RMSEC: error típico de calibración. R²: coeficiente de determinación de calibración. RMSECV: error típico de validación cruzada. r²: coeficiente de determinación de validación cruzada.

Cuando se usan estos modelos para clasificar las muestras de validación se consiguen resultados mejores que por LDA, con un acierto en clasificación del 92% para los cortes transversales (93.5% de acierto para *P. pinaster* y 90% para *P. radiata*) y de un 93.7% para los cortes longitudinales (87.5% *P. pinaster* y 100% *P. radiata*). Sin embargo, los resultados obtenidos por SIMCA son peores, especialmente en muestras de cortes transversales, que no superan el 54%, ya que muchas son clasificadas como pertenecientes a ambas especies.

3.3. MODELOS DE CLASIFICACIÓN EN BASE AL ORIGEN:

La Tabla 6 muestra la división de la población de datos utilizados como población de calibración y validación.

Tabla 6. Muestras de la población de calibración y de validación para los modelos de clasificación por origen.

	TRONCO		TABLA	
	CAL	VAL	CAL	VAL
<i>Pinus pinaster</i>	75 (25 por origen)	15 (5 por origen)	30 (15 por origen)	10 (5 por origen)
<i>Pinus radiata</i>	50 (25 por origen)	10 (5 por origen)		
Total	125	25	30	10

Con la población de datos de calibración y tras aplicar distintos tratamientos matemáticos a los espectros se obtienen los siguientes resultados que se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Porcentaje promedio de acierto en clasificación de los distintos tipos de modelos generados para la discriminación a nivel de origen de las muestras de cada especie para las secciones transversales y tangenciales.

Especie	Sección	Método estadístico		
		LDA	PLS-DA	SIMCA
<i>Pinus pinaster</i>	Transversal (rollo)	80 %	80 %	<50 %
	Tangencial (tabla)	100 %	100 %	87,5 %
<i>Pinus radiata</i>	Transversal (rollo)	100 %	100 %	80 %

En la discriminación por origen los mejores resultados obtenidos mediante LDA para la clasificación de las muestras de corte transversal (rollo) se obtienen tras aplicar SG 1,4,4,1 consiguiendo un acierto en clasificación del 80% (con una clasificación correcta del 80, 100 y 60% de las muestras procedentes de Asturias, Lugo y Coruña respectivamente) para la especie *P. pinaster* y un acierto del 100% para las de *P. radiata* (Asturias y Lugo). En el caso de las muestras de cortes tangenciales (Tabla 7) los resultados en validación son ligeramente superiores tras aplicar tratamientos por derivada Savitzky-Golay de primer y segundo orden (1,4,4,1 y 2,5,5,2) combinándolos con SNV, pero en todos los casos se consigue un acierto en validación del 100%. Los modelos para la discriminación en base al origen mediante PLS-DA mostraron unos coeficientes de determinación de calibración ligeramente inferiores a los obtenidos en la clasificación por especie pero superiores a 0.7 en todos los casos. Cuando se usan estos modelos para clasificar las muestras de validación se consiguen los mismos resultados que mediante LDA, con un acierto en clasificación del 80% para cortes transversales de *P. pinaster* (70% de acierto para las de Asturias, 100% para las de Lugo y 90% para las de Coruña) y del 100% para las de *P. radiata*. Nuevamente tenemos aciertos del 100% para las muestras tangenciales de *P. pinaster*. En el caso de los modelos por SIMCA los resultados son peores, al igual que ocurría para la discriminación por especies.

4. Discusión

Los resultados del experimento realizado demuestran la utilidad de la tecnología NIR para la discriminación por especies y la determinación del origen geográfico de la madera y ponen de manifiesto la importancia de tener en cuenta algunos factores metodológicos como la sección o el tiempo de exposición desde el corte de la madera con el fin de obtener resultados fiables.

Existen 3 tipos de sección de la madera: transversal, tangencial y radial. En experimentos como el de DA SILVA *et al.* (2016) sobre *Swetenia macrophylla* el muestreo indistinto de las tres secciones no pareció influir en los resultados. Sin embargo, en nuestro estudio el modo de presentación más adecuado para generar modelos de clasificación resultaron ser las secciones tangenciales. En el caso de BERGO *et al.* (2016) se tomaron las muestras sobre secciones radiales lo que, con respecto a la orientación de la estructura histológica y de las fibras de la madera, podría ser equivalente a nuestras secciones tangenciales, arrojando excelentes resultados (>96%).

Otro factor relevante es el tiempo de exposición de la madera al ambiente. En nuestro trabajo se observó, que éste influye claramente en la información espectral, de modo que en los PCA se observaba una clara discriminación entre las muestras de los ejemplares de *P. pinaster* que

llevaban más tiempo expuestos, con las muestras más “frescas” de la misma especie y localidad. Este hecho se debe a la evidente alteración físico-química consecuencia del secado y la exposición de la madera durante su almacenamiento. Este fenómeno ya había sido observado por SANDAK *et al.* (2010 y 2014) y SANDAK & SANDAK (2016) que lo atribuyen a procesos químicos como la oxidación durante el almacenamiento y recomiendan tomar las medidas en un periodo de tiempo inferior a los 6 meses desde la corta.

Las diferencias en los resultados de clasificación por origen obtenidos para *P. pinaster* (100%) vs *P. radiata* (80%) podrían indicar que algunas especies son más sensibles a la espectroscopia NIR que otras. Sin embargo, en otros experimentos realizados con varias especies tropicales (BERGO *et al.*, 2016) las diferencias entre especies son mínimas, inferiores al 2,5%. Por ello las diferencias que hemos encontrado podrían ser debidas al pequeño número de muestras de *P. radiata*, ya que en esa población de datos existe menor variabilidad. Probablemente, si se incrementa el número de muestras disminuirán las diferencias en la discriminación por especie. En cuanto a los tratamientos matemáticos aplicados a los espectros, consideramos que la derivada Savitzki-Golay de primer orden y el SNV han sido los más efectivos. Este tratamiento ha sido utilizado con el mismo fin por otros autores como SANDAK *et al.*, 2010, 2011; PRADES LÓPEZ *et al.*, 2013; BERGO *et al.*, 2016; DA SILVA *et al.*, 2016).

La mayor parte de los trabajos realizados en madera y derivados para la identificación del origen han empleado equipos que barren la región NIR completa (800-2.500 nm) con resultados de clasificación de entre el 60 % y el 100% de acierto, dependiendo de las especies utilizadas (SANDAK *et al.* 2010, 2011 y 2014; BERGO *et al.* 2016). Sin embargo, otros autores como DA SILVA *et al.* (2016) utilizaron equipos con menor rango de lectura (908-1.672 nm) obteniendo también resultados muy positivos (aciertos de entre 89,1 y 100 % en muestras procedentes de 5 países). El equipo comercial Microphazir utilizado en nuestro caso tiene un rango espectral de 1.600 a 2.400 nm y hemos obtenido resultados adecuados, si bien creemos que sería conveniente incrementar el rango de lectura utilizado, ya que probablemente permitiría una mayor capacidad discriminante.

Las diferentes condiciones del entorno como la altitud, la exposición, el tipo de suelo, las precipitaciones, los tratamientos selvícolas y otros factores ambientales o ecológicos afectan a las características físicas de los árboles, como ocurre con el espesor de los anillos o la estructura del tejido suberoso (PRADES LÓPEZ *et al.*, 2013) o los cambios en la composición como la humedad o el contenido en lignina (SANDAK *et al.* 2010, 2011). La discriminación por origen mediante la espectroscopía NIR se puede atribuir a las diferencias espectrales que dichos cambios (físicos y químicos) generan en los espectros NIR (SANDAK *et al.* 2011). Otros factores relacionados con la metodología empleada pueden influir en los resultados, como son: el método de preparación (si ha habido limpieza o lijado de la muestra), su rugosidad, las condiciones ambientales durante las mediciones, la cantidad de datos incluidos en el análisis multivariante, la edad de las muestras y su conservación (SANDAK *et al.*, 2014, SANDAK & SANDAK, 2016).

5. Conclusiones

Los resultados de este experimento muestran la capacidad de la Tecnología NIR para identificar la especie y el origen geográfico de la madera, incluso a pequeña escala (decenas de kilómetros) con identificaciones correctas de entre el 80-100%. Se ha podido comprobar que los resultados difieren en función de la sección y el tiempo de exposición al ambiente. Los mejores tratamientos para extraer información sobre el origen y la especie fueron derivadas Savitzky Golay de primer orden y SNV y los métodos más eficaces para la clasificación de las muestras de madera resultaron ser el LDA y el PLS-DA.

Estos resultados apuntan a que la tecnología NIR podría contribuir de forma eficiente al cumplimiento de la nueva reglamentación europea sobre el comercio de la madera (EUTR) y los requerimientos de trazabilidad exigidos. Sin embargo, para detectar la introducción de madera

ilegal en el mercado se requeriría generar grandes bases de datos espectrales de muestras cuya trazabilidad esté garantizada con las que generar modelos que permitan identificar la procedencia de muestras desconocidas. En esta labor centraremos nuestros esfuerzos futuros.

6. Agradecimientos

Agradecemos las facilidades y la disposición de las empresas colaboradoras en este muestreo: los aserraderos Hermanos García Rocha, Hijos de Ramón Rubal e Hijos de Vidal Bedia, así como a Francisco Álvarez, de CERNA Ingeniería.

7. Bibliografía

- BERGO, M.C.J., PASTORE, T.C.M., CORADIN, C.T.R., WIEDENHOEFT, A.C. & BRAGA, J.W.B; 2016. NIRS Identification of *Swietenia macrophylla* is robust across specimens from 27 countries. *IAWA Journal*, 37, 3: 420-430.
- DA SILVA, D.C., BRAGA, J.W.C., SOARES, L.F., BERGO, M.C.J., TEIXEIRA, N.C., GONTIJO, A.B., DA COSTA, N.R., CORADIN, V.T.R., WIEDENHOEFT, A.C. & PASTORE, T.C.M.; 2016. Identification of the origin of Big-leaf mahogany Wood from five Latin American countries via NIRS and PLS-DA. 2nd Workshop NIR spectroscopy for wood science and technology research, Italy. 28-30.
- DORMONTT, E.E. BONER, M., BRAUN, B., BREULMANN, G., DEGEN, B., ESPINOZA, E., GARDNER, S., GUILLERY, P., HERMANSONM J.C., KOCH, G., LEE, S.L., RIMBAWANTO, M.A., THOMAS, D., WIEDENHOEFT, A.C., YIN, Y., ZAHNEN, J. & LOTE, A.J. 2015. Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging. *Biol Cons*, 191: 790-798.
- GLOBAL WITNESS 2015. *Blood Timber*: Global Witness, 59 pp.
- HOARE, A. 2015. Tackling illegal logging and the related trade. Chatham House, London. 64 pp.
- FOREST TRENDS. 2013. *European Trade Flows and Risk*. Forest Trends, Washington DC. 27 pp.
- NELLEMANN C. & INTERPOL ENVIRONMENTAL PROGRAMME (Eds.) 2012. *Green Carbon, Black Trade*. Interpol, Norway. 67 pp.
- PASQUINI, C. 2003. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications. *J. Braz. Chem. Soc.*, 14, 1: 198-219.
- PRADES LÓPEZ, C., GÓMEZ SÁNCHEZ, I., GARCÍA OLMO, J. y GONZÁLEZ ADRADOS, J.R. 2013. Análisis discriminante de la procedencia geográfica de planchas y tapones de corcho natural mediante espectroscopia en el infrarrojo cercano. 6º Congreso Forestal Español, Vitoria. 1-13.
- SANDAK, A., SANDAK, J. & NEGRI, M. 2010. Potential of mid and near infrared spectroscopy for geographical origin recognition of forest based biomasses. *III International Symposium on Energy from Biomass and Waste*, Venice, Italy, Libro de resúmenes, 7 pp.
- SANDAK, A., SANDAK, J. & NEGRI, M. 2011. Relationship between near-infrared (NIR) spectra and the geographical provenance of timber. *Wood Sci Technol*, 45, 1:35-48.
- SANDAK, A.; SANDAK, J. & NEGRI, M. 2012. Studies on chemical composition of spruce wood in relation to its geographical origin by selected non-destructive methods. IUFRO All Division 5 Conference, Lisbon, Portugal.
- SANDAK, A., SANDAK, J., NEGRI, M. & PABLUBICKI, B. 2014. Relationship between NIR spectra and the geographical provenance of timber. 1st Workshop NIR spectroscopy for wood science and technology research, Italy. 24-25.
- SANDAK A. & SANDAK J. 2016. Bio-materials characterization with NIR. Conference, Ivalsa Trees and timber institute, Firenze, Italia. 65 pp.
- SMIRNOV, D.Y. (Ed.) 2013. *Illegal logging in the Russian Far East*. Smirnov, D.Y. (ed.) Kabanets, A.G., Milakovskiy, B.J., Lepeshkin, E.A. & Sychikov, D.V. WWF, Moscow. 39 pp.
- TSUCHIKAWA, S. & KOBORI, H. 2015. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *J. Wood Sci.*, 61: 213-220.
- WORLD BANK 2002. *Sustaining Forests, A Development Strategy*, Washington DC, USA. 99 pp.
- WORLD BANK 2006. *Strengthening Forest Law Enforcement and Governance, Addressing a Systemic Constraint to Sustainable Development*, Washington DC, USA. 93 pp.

WWF, 2004. *Failing the Forests: Europe's illegal timber trade*. WWF, 102 pp.