

AVANCES EN TECNOLOGÍAS ÓPTICAS Y LÁSER PARA APLICACIONES DE DETECCIÓN DEL ESTADO DE LA CALZADA

M. Ruiz-Llata & P. Martín-Mateos & G. Guarnizo & P. Acedo
Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid, España

mruizl@ing.uc3m.es

S. Aparicio-Hill

Alvac SA, España

sapariciohill@alvac.es

RESUMEN

En este documento se resumen los experimentos que se han llevado a cabo en el Laboratorio de Instrumentación Optoelectrónica con el fin de identificar la técnica de medida más apropiada basada en un sistema óptico para la medida remota del estado de la calzada. El objetivo de dicho sensor es su funcionamiento a bordo de vehículos de mantenimiento, por lo que en el diseño de los experimentos se han tenido en cuenta consideraciones de robustez y fiabilidad. Es decir, los experimentos se han diseñado de tal manera que la prueba de los prototipos fuera del laboratorio no presente inconvenientes. Los estados de la superficie de la carretera que se consideran en este estudio son seco, con agua o con hielo y además se contempla la medida de la sal residual en la superficie del pavimento, incluso en condiciones de pavimento seco.

1. INTRODUCCIÓN

Las agencias responsables del mantenimiento de carreteras se enfrentan a un dilema cada vez más difícil: por un lado tienen que lograr cumplir las cada vez más estrictas normas de reducción de riesgos, mientras que al mismo tiempo, sufren una gran presión para reducir los costes, los daños a las infraestructuras y el impacto ambiental de las operaciones de vialidad invernal. La apuesta para solucionar este dilema recae en la capacidad de monitorizar las condiciones de la calzada y los resultados de las acciones de mantenimiento, de forma que se pueda optimizar de forma segura el uso del material y del equipamiento, tal y como vehículos quitanieves y sustancias químicas para la prevención de la formación de hielo.

La monitorización en detalle de la calzada en todo su recorrido requeriría el despliegue de numerosos puntos de medida y el despliegue de grandes redes de comunicaciones de datos. El coste de esta solución justifica que una solución más elegante sea incluir tecnologías de medida que sean móviles de forma que se reciban datos integrales de la red de carreteras [1]. Las ventajas de estas tecnologías móviles es que proporcionan información instantánea, relevante y local sobre los parámetros ambientales, como temperatura y humedad, y también parámetros de la carretera, como temperatura de la superficie de la calzada o presencia de hielo.

El primer reto ya superado para poder recibir información en tiempo real de los sistemas móviles es de comunicaciones; actualmente existen tecnologías maduras ya instaladas de manera masiva en los vehículos utilizados por las agencias de mantenimiento. Sin embargo, la tecnología asociada a los propios sensores y a la fusión de los datos que estos proporcionan para obtener información relevante se encuentran aún en fase de investigación y desarrollo, con un catálogo muy reducido de productos disponibles en el

mercado y con precios elevados. El motivo es que los sistemas de información del tiempo en carreteras y de su estado imponen restricciones técnicas importantes que dificultan su implementación (como resistencia a la corrosión, resistencia frente a vibraciones e impactos, capacidad de medida a velocidades normales de circulación, ...).

Una vía muy prometedora es el desarrollo de tecnologías para sensores remotos embarcados basadas en sistemas ópticos: los sensores ópticos son capaces de detectar la presencia de sustancias específicas analizando el cambio en las propiedades ópticas de un haz de luz que se refleja en o se transmite a través del medio que contiene dicha sustancia, además lo puede hacer en tiempo real. Algunas aplicaciones de esta tecnología óptica incluyen medidas de visibilidad, evaluación de la opacidad del aire en túneles para la detección de humo, sistemas lidar para medida de distancias y velocidad, o la evaluación del estado de la calzada. Para esta última aplicación, se han demostrado sensores de agua y hielo basados en espectroscopia infrarroja [2] y polarización de la luz [3], también se han mostrado medidas de salinidad basadas en espectroscopia Raman [4] y espectroscopia de fluorescencia en sal tratada con aditivos [5]. Estas técnicas también se utilizan con éxito en otros sistemas de instrumentación para aplicaciones industriales, biomédicas y medioambientales.

En este trabajo se proponen y se evalúan sensores ópticos capaces de proporcionar información del estado de la calzada que utilizan fuentes de luz basadas en semiconductores. Las ventajas principales de este tipo de fuentes ópticas, como diodos láser y LED, es su disponibilidad y su bajo precio en un rango (cada vez más amplio) de longitudes de onda, abarcando desde el ultravioleta (alrededor de 400 nm e incluso por debajo de este valor) hasta el infrarrojo, por debajo de 2000 nm tradicionalmente, pero ya se encuentran disponibles comercialmente láseres de semiconductor de llegan hasta 14 μm .

Este artículo se centra en la descripción de los experimentos que se han llevado a cabo en el Laboratorio de Instrumentación Optoelectrónica de la Universidad Carlos III de Madrid. El objetivo principal de estos experimentos ha sido explorar la aplicación de fuentes de luz basadas en semiconductores para la medida remota del estado de la calzada como consecuencia de fenómenos meteorológicos y de las actividades de vialidad invernal. La información relevante es por tanto si la calzada está seca o no y si sobre la misma hay una capa de agua, hielo o nieve, la temperatura del asfalto y la temperatura de congelación. La medida del punto de congelación es una medida indirecta de la cantidad residual del producto anticongelante remanente de tratamientos previos, por lo tanto en esta investigación lo que se considera es la medida directa de la presencia de sal, ya que es la sustancia anticongelante que se utiliza con mayor frecuencia.

El artículo se divide de la siguiente manera: en el próximo apartado se describen los aspectos teóricos básicos y el montaje experimental que se ha realizado en el laboratorio. En el tercer apartado se presentan dos alternativas distintas que permiten distinguir la presencia de agua y hielo sobre la superficie de la calzada. El cuarto apartado describe una prueba de concepto para la medida de sal sobre pavimento seco. El último apartado corresponde a las conclusiones y las propuestas de trabajo futuro.

2. ESQUEMA ÓPTICO DE REFERENCIA PARA SENSORES REMOTOS DEL ESTADO DE LA CALZADA

La técnica que se propone para la medida remota de agua, hielo y otras sustancias sobre la superficie del pavimento se basa en técnicas de espectroscopia por reflexión difusa que combinan el uso de fuentes de luz de semiconductor con técnicas de detección síncrona. Si un haz de luz que se propaga en el aire incide sobre una superficie, parte de la luz se refleja. Esta reflexión es una mezcla de reflexión especular (con el mismo ángulo que el haz de luz incidente) y reflexión difusa, con haces de salida en todas las direcciones. La reflexión difusa se debe a la parte de luz que se transmite al material, la cual cambia su dirección de propagación (se dispersa) debido a la presencia de partículas en el mismo y eventualmente vuelve a salir a la superficie con una dirección de propagación arbitraria (ver Figura 1). La reflexión difusa es el efecto óptico que motiva por ejemplo que la nieve sea blanca a pesar de estar formada por cristales de hielo que son transparentes: estos cristales no absorben ningún color pero dispersan todas las longitudes de onda (colores) en todas las direcciones y por tanto un observador lo que ve es luz blanca [6].

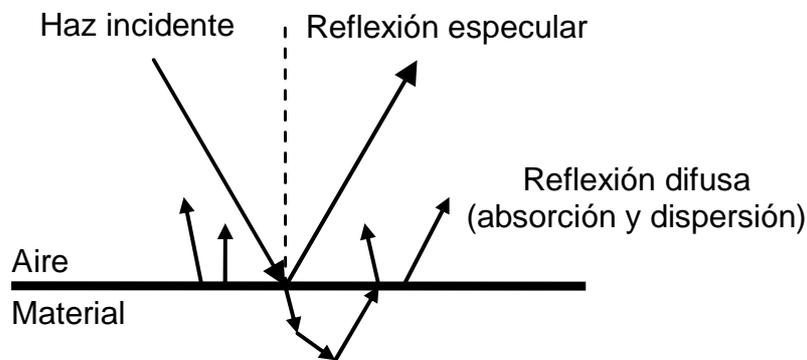


Figura 1. Reflexiones especular y difusa en la superficie de un material

La cantidad de luz que se refleja de manera difusa depende de las propiedades ópticas del material: Depende de la parte real del índice de refracción del material (n), el cual limita la cantidad de luz que se transmite al material. Depende de la parte imaginaria del índice de refracción del material (K), que es proporcional al coeficiente de absorción que cuantifica la atenuación de intensidad de un haz que se propaga en el medio. También depende de los coeficientes de dispersión. Estas propiedades ópticas no son constantes, sino que dependen de la longitud de onda del haz de luz con el que se ilumina el material. Como ejemplo en la Figura 2 se muestra la variación de la parte imaginaria del índice de refracción con la longitud de onda para el agua y para el hielo. Se puede comprobar en esta figura como existen dos máximos de absorción para el hielo, dentro del rango de longitudes de onda representados, a 1500 nm y 2000 nm aproximadamente. El agua también presenta dos máximos de absorción pero desplazados ligeramente en la longitud de onda.

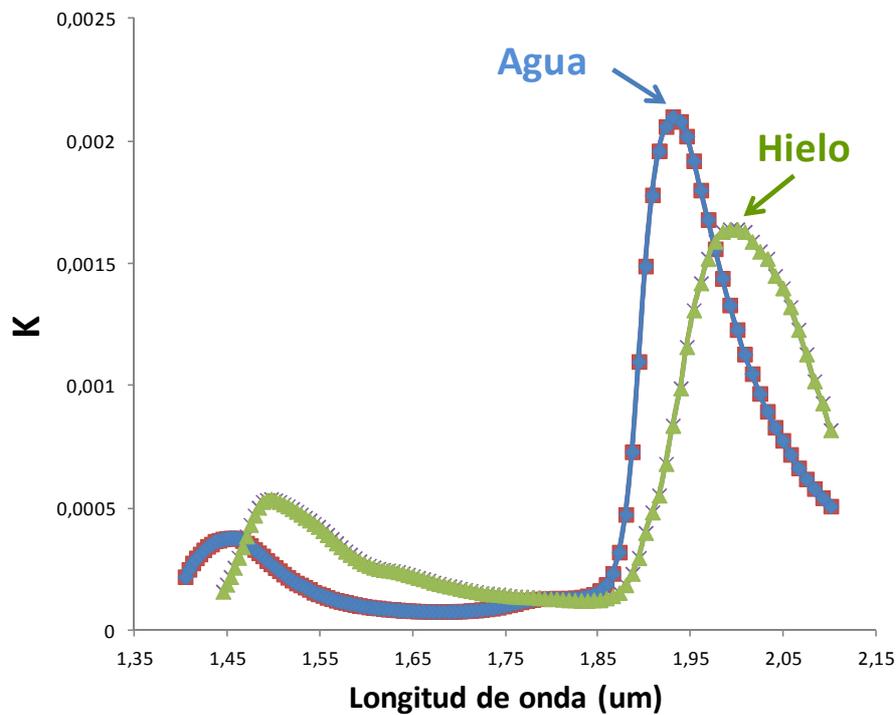


Figura 2. Parte imaginaria del índice de refracción del agua y del hielo en función de la longitud de onda (los datos de la figura se han extraído de [7])

Es posible identificar la presencia de una sustancia específica analizando su espectro de reflexión ya que éste es característico de cada material. Los sistemas de espectroscopia típicamente utilizan fuentes de luz de amplio espectro (como lámparas de Xenón) y, ya sea en emisión o en detección, y con la ayuda de redes de difracción y sistemas opto-mecánicos complejos, realizan la descomposición espectral. Motivado por el hecho de que los sistemas móviles de monitorización de carreteras y parámetros ambientales imponen restricciones técnicas importantes que dificultan su implementación (resistencia a la corrosión, resistencia a vibraciones mecánicas e impactos y capacidad para medir a velocidades normales de circulación...), lo que proponemos es descartar el uso de sistemas ópticos complejos y utilizar en su lugar sistemas basados en fuentes de luz de semiconductor, de esta manera se puede evitar la necesidad de sistemas opto-mecánicos (para los que puede ser complicado mantener el alineamiento en las condiciones mencionadas).

Las fuentes de luz de semiconductor presentan dos ventajas fundamentales a la hora de diseñar sensores ópticos remotos. La primera es que emiten luz monocromática: su espectro de emisión está centrada en una longitud de onda específica con un ancho espectral del orden de 40 nm en el caso de los LEDs y tan estrecho como 0.01 nm en el caso de los diodos láser. La segunda ventaja es que la intensidad de luz emitida se puede modular directamente utilizando circuitos electrónicos y por tanto permiten incorporar técnicas de detección de alta sensibilidad, como la detección síncrona, para evitar la influencia de la luz ambiente e incrementar la resolución. Teniendo en cuenta estas consideraciones se han diseñado diversos experimentos para analizar la posibilidad de utilizar láseres de semiconductor para identificar el estado de la calzada en un sistema móvil.

En la Figura 3 se presenta un esquema simplificado de dichos experimentos. Consiste en una o varias fuentes de luz de semiconductor que iluminan la superficie del pavimento a

una distancia constante. Se utiliza una lente para acotar el área iluminada. Como se verá, en la mayoría de los experimentos las longitudes de onda de iluminación se encuentran en el infrarrojo próximo. Se utiliza un generador de señal para generar una señal sinusoidal que modula la intensidad de luz de salida empleando un índice de modulación (relación entre las amplitudes máximas y mínimas) cercano al 100% y una frecuencia en el rango de decenas de KHz. En esta figura también se puede apreciar un único fotodiodo (independientemente del número de longitudes de onda de iluminación se usa un único detector) que mide la reflexión difusa de la superficie de test y tras una adecuada amplificación, un demodulador síncrono con la misma referencia que la señal de modulación, permite medir únicamente la amplitud de la señal reflejada a la longitud de onda de emisión. Se han usado para implementar esta técnica de detección tanto amplificadores lock-in comerciales (Stanford Research Systems SR830) como diseños propios realizados en nuestros laboratorios. La superficie de test típica empleada ha sido un pedazo de asfalto seco o al que se le ha aplicado agua, hielo o sal dependiendo del experimento.

En la Figura 4 se muestra una fotografía de uno de los experimentos. En ella se aprecia la superficie de test cubierta de agua y dentro de una cámara climática. Esta cámara permite modificar las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) por lo que se llega a formar hielo cuando se mantiene la temperatura por debajo de 0°C. El fotodiodo también está dentro de la cámara y el haz de iluminación se introduce a través de una fibra óptica, de manera que los diodos láser y el resto de componentes electrónicos están fuera de la cámara. En la fotografía se pueden apreciar las monturas en tubo que alojan la óptica asociada a la emisión y a la detección.

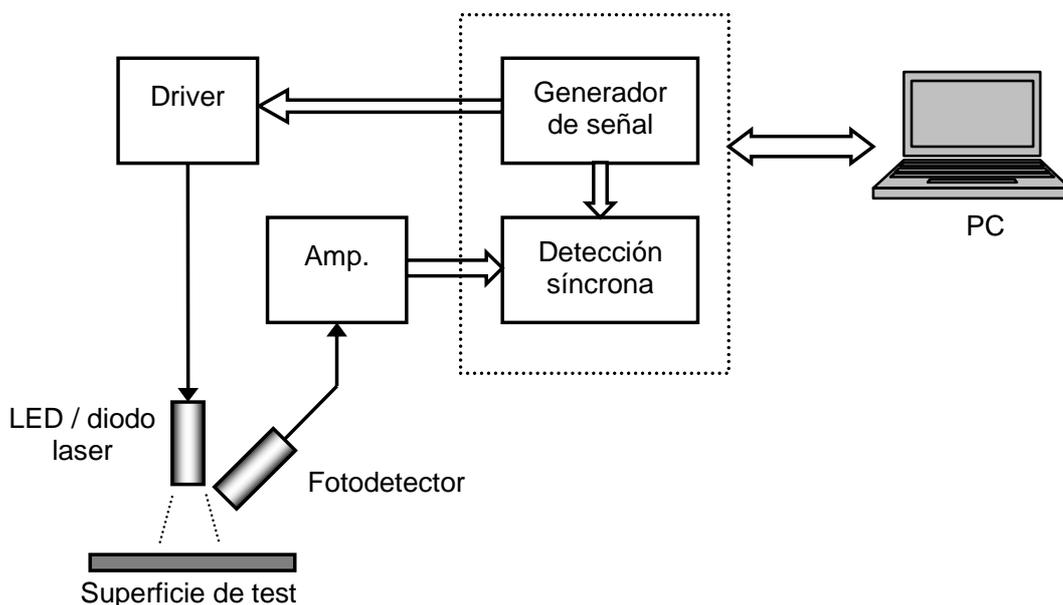


Figura 3. Esquema óptico de referencia para sensores del estado de la calzada

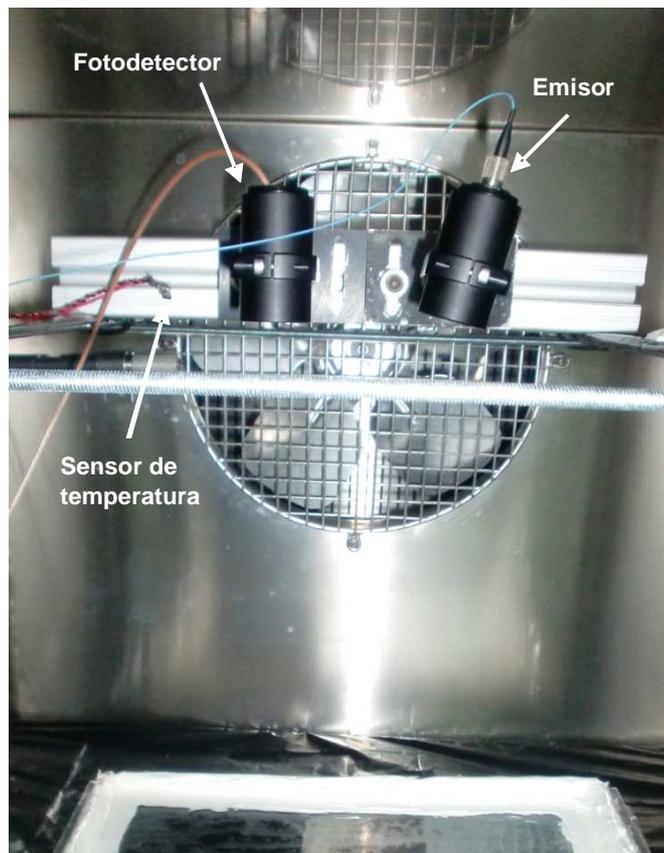


Figura 4. Fotografía de uno de los experimentos en cámara climática

3. DISTINCIÓN DE AGUA Y HIELO BASADA EN BIRREFRINGENCIA

La birrefringencia es una propiedad óptica de algunos materiales que consiste en que el índice de refracción (n) depende de la dirección de propagación de la luz y de su estado de polarización (orientación del plano de oscilación de las ondas ópticas). Como la cantidad de luz que se refleja depende del índice de refracción, en un material birrefringente la cantidad de luz reflejada dependerá de la orientación de la polarización a la que se realiza la observación. Para nuestra aplicación que consiste en determinar el estado de la calzada podemos utilizar esta propiedad óptica para distinguir la presencia de agua o hielo [3], ya que el agua en estado líquido no es birrefringente pero el hielo sí lo es.

En este experimento se ha utilizado como emisor un diodo láser modelo DL-5032 de Sanyo, el cual emite a 830 nm (infrarrojo) y el cual se mantiene con una polarización predominante con la ayuda de un polarizador. Con respecto al montaje descrito en la sección anterior se incorpora al sistema un fotodiodo adicional modelo BPW34 tal y como se muestra en el esquema de la Figura 5. En frente de cada uno de los dos detectores se coloca un polarizador; el eje de polarización entre estos polarizadores es perpendicular y a su vez ambos forman un ángulo de 45° con el polarizador del emisor. Los resultados de este experimento se muestran en la Figura 6. La traza superior de esta figura representa la evolución de la temperatura en el interior de la cámara climática, en ella se pueden observar dos ciclos de calentamiento/enfriamiento con una duración superior a una hora cada uno, de forma que hay tiempo suficiente para que se congele la película de agua presente en la superficie de test. La traza inferior muestra el cociente entre la intensidad

de luz medida con cada detector (relación entre intensidades con polarización cruzada). Las zonas sombreadas muestran los intervalos de tiempo para los que hay o bien solamente agua en estado líquido o bien solamente agua congelada (hielo). En estas zonas se observa que este cociente es diferente para el agua que para el hielo por lo que se puede concluir que es posible utilizar el fenómeno de la birrefringencia para distinguir la presencia de agua o hielo sobre la superficie de un pavimento utilizando un sensor óptico basado en fuentes de luz de semiconductor (LED o diodo láser). En la Figura 6 también se aprecian algunos efectos no deseados que se deben a la condensación de agua en la superficie de los componentes ópticos.

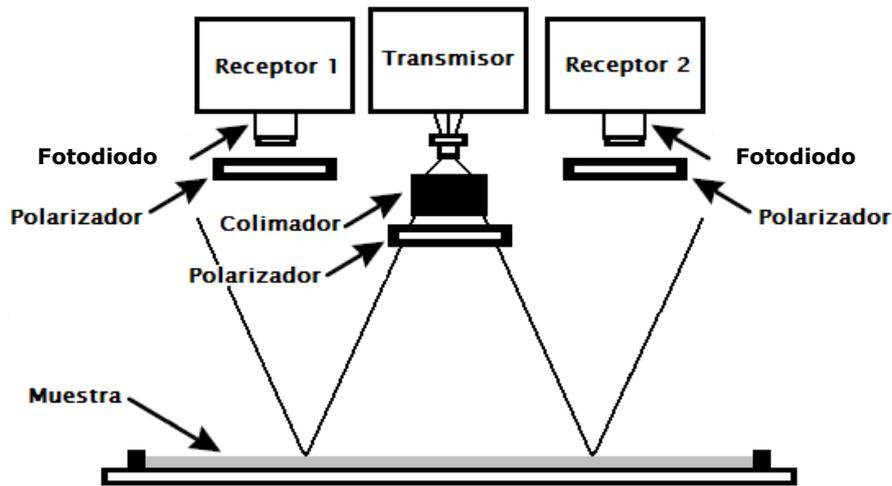


Figura 5. Montaje experimental para medidas de birrefringencia del hielo

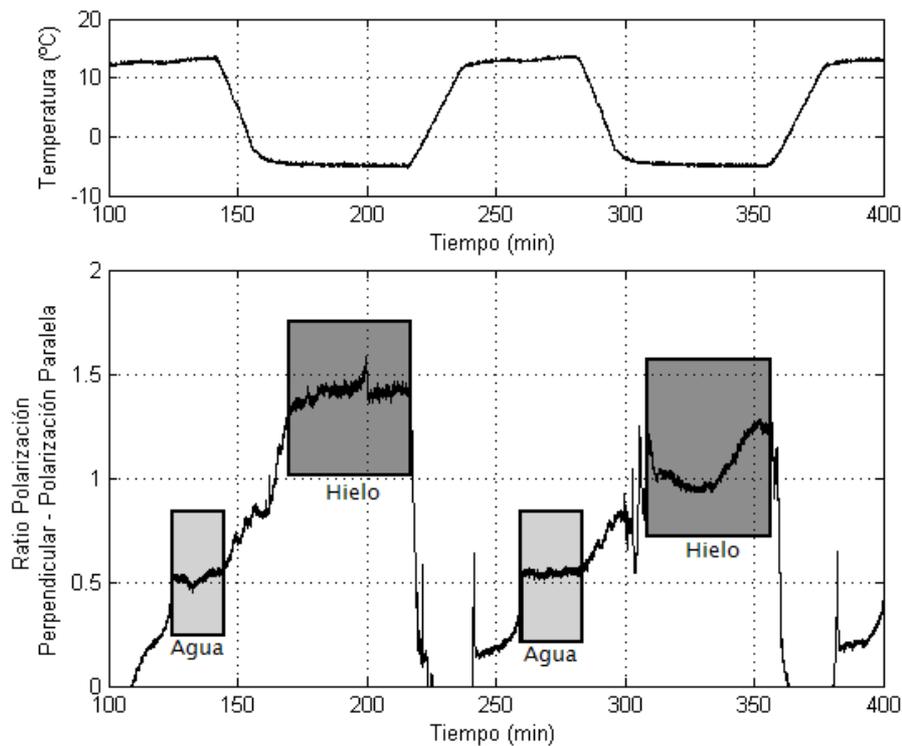


Figura 6. Resultados de la identificación agua/hielo basado en medidas de birrefringencia. El estado sólido o líquido se puede distinguir claramente

4. DISTINCIÓN DE ESTADOS DE CALZADA BASADO EN COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DIFERENTES

En esta sección se explora las propiedades de dependencia con la longitud de onda del índice de refracción complejo en el infrarrojo próximo para la implementación de sensores remotos del estado de la calzada y, para ello, se emplea el mismo esquema descrito en la sección 2. La presencia de agua en la superficie de la calzada, en función del espesor de la capa de agua, varía la amplitud de la reflexión difusa, por lo que es posible identificar el estado de la calzada (seca o mojada) simplemente iluminando un área de la misma y analizando el espectro de la luz reflejada. Además la dependencia de las propiedades ópticas del agua es diferente dependiendo de su estado, líquido o sólido (hielo), por lo que la caracterización espectral tiene mucha información del estado de la calzada.

La selección de las longitudes de onda de iluminación es una de las especificaciones de diseño más importantes para estos tipos de sensores. Para poder elegirlos de manera conveniente para nuestra aplicación nos hemos basado en estudios previos de las propiedades ópticas del agua y del hielo, las cuales han sido estudiadas en profundidad desde hace tiempo [7]: En el infrarrojo próximo, la parte real del índice de refracción (n) es aproximadamente constante con la longitud de onda, mientras que la parte imaginaria (K), la cual está relacionada con el coeficiente de absorción, presenta máximos a longitudes de onda determinadas. Estos máximos están ligeramente desplazados en la longitud de onda para el agua y para el hielo. Además uno de estos picos está próximo a 1550 nm (ver Figura 2), longitud de onda a la que hay gran disponibilidad a bajo coste de emisores, detectores y componentes ópticos ya que se corresponde con una de las ventanas de comunicaciones ópticas. A 1310 nm (otra de las ventanas de comunicaciones ópticas), la parte imaginaria del índice de refracción tiene un valor mínimo tanto para el agua como para el hielo. Por tanto, con el fin de explorar este principio de medida, se utilizaron como fuente de luz tres diodos láser estándar de tipo DFB acoplados a 1310 nm, 1470 nm y 1550 nm. Para combinar las tres longitudes de onda sobre una única área iluminada se utilizó un acoplador de fibra también estándar 1310/1550 nm (ver Figura 4).

El sistema se calibró utilizando una cámara climática. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de las señales de salida del sensor tras el amplificador síncrono. La traza azul (en la posición más inferior) es proporcional a la luz detectada a 1550 nm, la traza verde (superior) es proporcional al cociente entre la luz detectada a 1310 nm y 1550 nm, y la traza roja (en el medio) es proporcional al cociente entre la luz detectada a 1310 nm y 1470 nm. Lo que se observa en estas medidas es que aunque la potencia óptica medida a una longitud de onda concreta (ej: 1550 nm) no sea constante, los cocientes sí que lo son para una sustancia específica (agua o hielo). La distancia entre estos cocientes depende de la sustancia presente sobre la superficie del pavimento y por tanto se concluye que se puede identificar el estado de la calzada con la información que proporcionan estas señales.

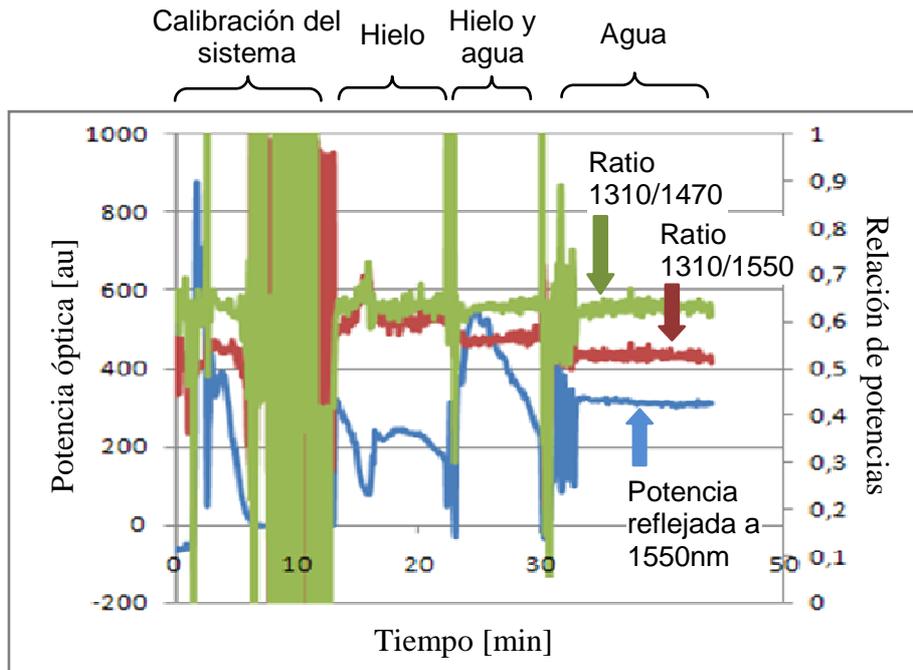


Figura 7. Señales de salida del experimento basado en medida de las diferencias de absorción

Se han realizado varias medidas del estado de la calzada utilizando este principio de medida. En los experimentos se ha modificado la temperatura del pavimento, se han utilizado distintos espesores de la capa de agua y de hielo y se han tomado las medidas a distintas distancias del sensor a la superficie. En la Figura 8 se muestra un resumen de los resultados de estas medidas. En dicha figura, el eje horizontal es la relación entre las potencias ópticas detectadas a 1470 nm y 1310 nm y el eje vertical es la relación entre las potencias ópticas a 1550 nm y 1310 nm. Se pueden observar agrupaciones de datos los cuales cada uno se corresponde con un estado de la superficie de la calzada diferente: Los puntos representados con rombos de color azul corresponden a medidas con la calzada seca, los puntos representados con un triángulo de color verde corresponden a medidas tomadas con la calzada mojada y los puntos representados con una bola de color naranja corresponden a medidas tomadas con la superficie helada. De estos resultados se concluye que es posible utilizar esta técnica de medida óptica para distinguir entre los posibles estados de la calzada.

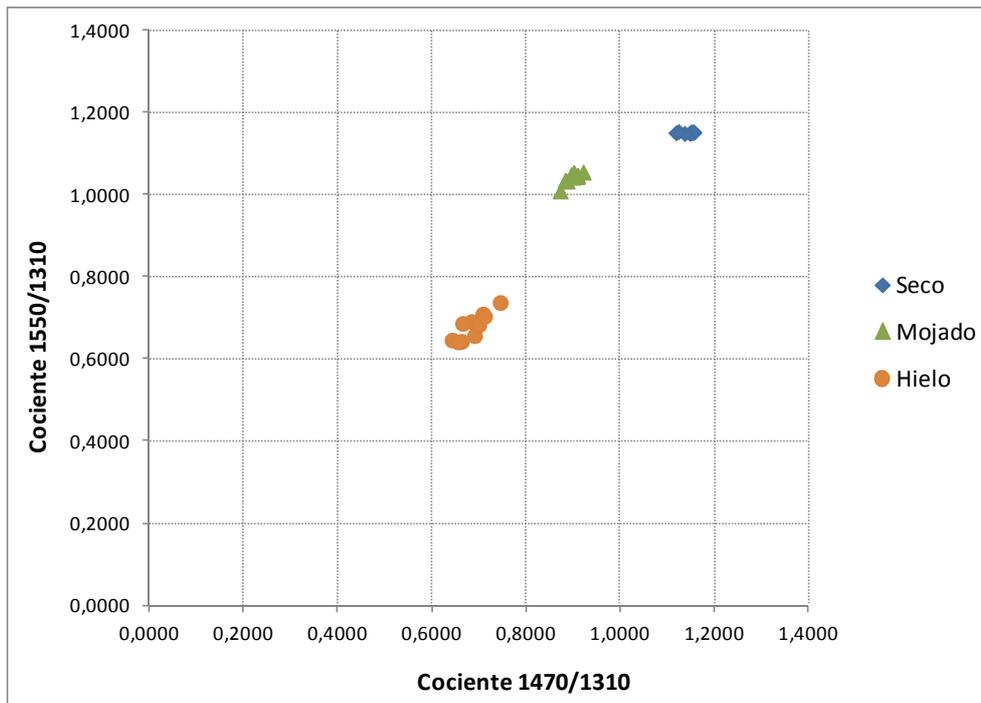


Figura 8. Clasificación de estados de la calzada basada en medidas de diferencia de absorción. Las agrupaciones de datos corresponden a estados de la calzada distintos

5. DETECCIÓN DE SAL RESIDUAL EN LA SUPERFICIE DE LA CALZADA BASADA EN FLUORESCENCIA

Otro de los parámetros que determina el estado de la calzada durante la campaña de invierno es la presencia de sal residual procedente de actividades preventivas de formación de hielo previas. La monitorización de la sal residual es útil para evitar su distribución en exceso y por tanto sus consecuencias económicas y medioambientales.

En este sentido, en un primer momento tratamos de extender la técnica de medida utilizada en el apartado anterior y con el esquema de medida de la Figura 3 para detectar sal residual. A pesar de que es conocido que el índice de refracción de una solución salina es proporcional a su concentración no se obtuvieron resultados concluyentes del experimento. Además este principio de medida no sería útil a priori en medidas sobre asfalto seco ya que las propiedades ópticas de la sal son prácticamente constantes con la longitud de onda e independientes de la polarización.

Otras técnicas de medida óptica remota prometedoras para la monitorización de sal son inducción de la fluorescencia [5], espectroscopia Raman [4], y LIBS [1]. Teniendo en cuenta que se plantea el diseño de un sensor embarcado, la primera de ellas, fluorescencia inducida, presenta grandes ventajas comparada con las otras dos técnicas espectrales mencionadas: En primer lugar, como las longitudes de onda de emisión y detección están muy separadas la una de la otra en el espectro óptico, no se requieren componentes ópticos críticos de discriminación espectral (como monocromadores basados en redes de difracción) para los cuales es complicado mantener el alineamiento óptico. En segundo lugar no se precisa el uso de fuentes láser pulsadas de alta potencia, lo que la hace más segura para los operadores y para los usuarios.

La fluorescencia es un fenómeno óptico por el cual un material absorbe luz en una longitud de onda determinada y la emite a otra longitud de onda más larga. Los cristales de sal (NaCl) presentan fluorescencia debido a impurezas e imperfecciones de la red cristalina y por tanto en este trabajo se propone explotar esta característica de la sal, aunque también es posible, tal y como se ha propuesto anteriormente [5], utilizar la fluorescencia de algunos aditivos que se añaden a la sal de carreteras.

Para evaluar las posibilidades del diseño de un sensor basado en la fluorescencia natural de la sal se ha comenzado estudiando las características de luminiscencia de distintas muestras de sal: se han estudiado los espectros de absorción y de emisión de muestras de sal de mesa, muestras de sal marina utilizada en la preparación de salmueras y sal de mina utilizada en tratamientos preventivos y curativos. Las distintas muestras de sal se han caracterizado utilizando un fluorímetro (modelo F900 de Edinburgh) con un rango tanto en excitación como de emisión de 200 nm a 900 nm y equipado con una sonda de fibra para medidas de fluorescencia en reflexión. La sonda de fibra se colocó a una distancia de 4 mm de la superficie de la muestra de sal y se tomaron mapas de excitación-emisión en todo el rango del instrumento para los tres tipos de sal. Estos mapas representan en un diagrama en tres dimensiones la intensidad de luz recibida en una longitud de onda de emisión concreta λ_{em} cuando se ilumina la muestra a una longitud de onda de excitación concreta λ_{exc} . Todos los mapas mostraron máximos de intensidad de luz de emisión a las longitudes de onda $\lambda_{em} = 310$ nm y $\lambda_{em} = 610$ nm, en ambos casos cuando la longitud de onda de excitación era en torno a $\lambda_{exc} = 270$ nm. En la Figura 9 se muestran los resultados más relevantes en un diagrama bidimensional que representa el espectro de emisión de las distintas muestras de sal cuando se iluminan a una longitud de onda de excitación $\lambda_{exc} = 273$ nm. Pueden apreciarse claramente los dos picos de emisión a 310 nm y a 610 nm, por lo que se concluye que la fluorescencia en la región visible del espectro asociada al color rojo (610 nm) se podría utilizar como indicador de la cantidad de sal residual en la superficie de una calzada.

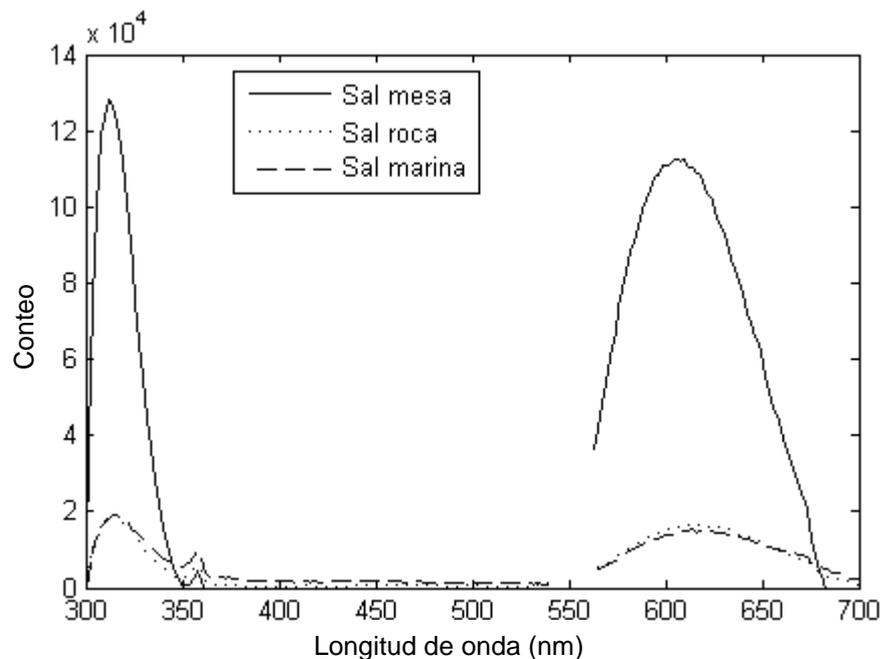


Figure 9. Espectro de emisión de muestras de sal cuando se ilumina con $\lambda_{exc} = 273$ nm

En este experimento también se ha utilizado el montaje experimental representado en la Figura 3 modificando los componentes ópticos para testar esta técnica de medida de fluorescencia para la implementación de sensores de salinidad residual en carreteras. En estas pruebas se ha utilizado como dispositivo emisor un LED ultravioleta (UVTOP275) cuyo espectro de emisión está centrado en 275 nm y también se ha colocado un filtro rojo delante del fotodetector de manera que sólo se mide la luz emitida en el entorno de 610 nm. Para este sistema se ha desarrollado una técnica de detección específica que tiene en cuenta el tiempo de vida de fluorescencia. Este sistema se ha utilizado en diversos escenarios que consisten en una superficie sobre la que se distribuye de manera relativamente homogénea una cantidad de sal. Para ellos se ha tenido en cuenta que en un tratamiento típico preventivo para evitar la formación de hielo se esparcen del orden de 15 g/m² de sal, así que se han preparado cinco escenarios con distintas dosificaciones de sal desde 0 hasta 20 g/m² y se han analizado con el prototipo de sensor desarrollado. Los resultados de estas medidas se muestran en la Figura 10, en la que es relevante destacar el hecho de que gran parte de la incertidumbre asociada a las medidas se debe a la distribución de las muestras de sal no completamente uniforme ni homogénea en todas las pruebas. En esta figura se puede observar que se mide con incertidumbres típicas en el rango de 2 g/m² mientras que es posible detectar dosificaciones por debajo de los límites requeridos (15 g/m²).

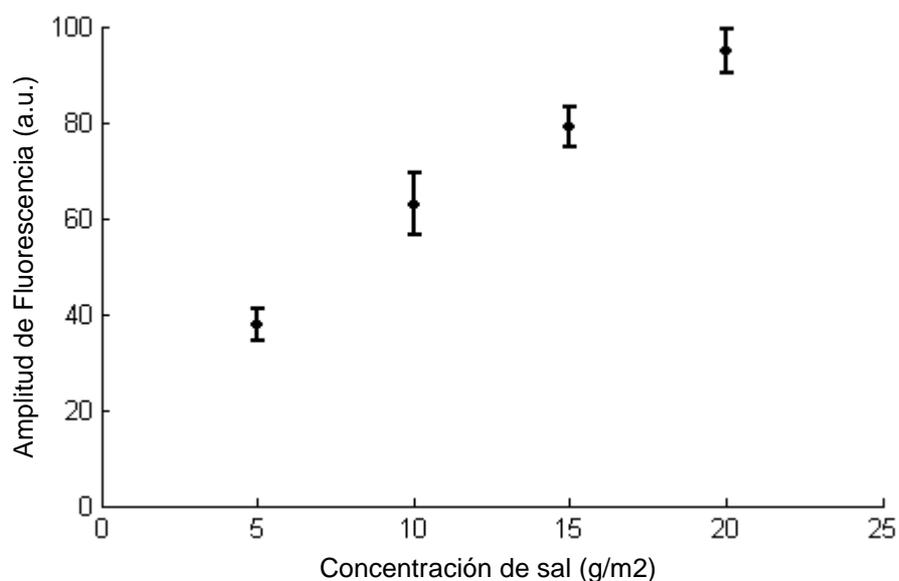


Figura 10. Resultados de las medidas de concentración de sal sobre pavimento seco. Existe una relación lineal entre la medida y la cantidad de sal residual

6. CONCLUSIONES

En este artículo se han investigado diferentes técnicas para la implementación de un sensor óptico remoto para la monitorización del estado de la calzada. El objetivo es desarrollar un sistema de medida robusto que pueda monitorizar la superficie de la calzada estando embarcado en un vehículo de mantenimiento. Lo que se propone es evitar la utilización de sistemas opto-mecánicos complejos y explotar las características de los emisores de luz basados en semiconductor, caracterizados por espectros de emisión estrechos y que permiten la modulación directa de la intensidad de salida para ser utilizados con técnicas de detección síncrona.

Las conclusiones de nuestras investigaciones, cuyas aportaciones principales se han resumido a lo largo de este artículo, es que la técnica de espectroscopia por reflexión difusa basada en diodos láser es óptima para el desarrollo de un sensor móvil remoto para la determinación del estado del pavimento [8]. Hemos demostrado que el uso de láseres de comunicaciones de bajo coste proporciona buenos resultados en la clasificación del estado de la calzada y consideramos que los resultados se pueden mejorar (en términos de resolución y de potencia óptica requerida para los emisores) si se utilizan otras longitudes de onda para desarrollar dicho sensor.

Otra conclusión relevante es que es difícil expandir esta técnica para la monitorización de sal residual, en especial si el pavimento está seco. En este caso se ha mostrado en este artículo que es posible utilizar la fluorescencia de la sal (o la fluorescencia de aditivos de sustancias anticongelantes) para determinar la sal residual de tratamientos previos.

REFERENCIAS

1. Z. Ye, X. Shi, C.K. Strong, R.E. Larson, (2012) "Vehicle-based sensor technologies for winter highway operations," *IET Intell. Transp. Syst.* 6, 336-345
2. J. Casselgren, M. Sjödaahl, M. Sanfridsson, and S. Woxneryd, (2007) "Classification of road conditions—to improve safety," in *advanced Microsystems for Automotive Applications 2007* (Springer, 2007).
3. J. Casselgren, M. Sjödaahl, (2012) "Polarization resolved classification of winter road condition in the near-infrared region," *Appl. Opt.* 51, 3036-3045.
4. T. H. Kauffmann, M.D. Fontana, (2012) "Optical sensor of salt concentration: Uncertainty evaluation," *Sens. Actuator B-Chem.* 161, 21– 27.
5. D.S. Hammond, L. Chapman, A. Baker, J.E. Thornes, A Sandford, (2007) "Fluorescence of road salt additives: potential applications for residual salt monitoring," *Meas. Sci. Technol.* 18, 239–244
6. E. Hetch (2001). *Optics*. Addison-Wesley; 4th edition
7. Kou L., Labrie D., Chylek P. (1993) "Refractive indices of water and ice in the 0.65- to 2.5- μm spectral range". *Applied Optics* 32 (19), 3531-3540
8. P. Acedo, M. Ruiz-Llata. Device for measuring the state of the roadway. EP11809317.8 (18/02/2013).

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría expresar nuestra gratitud a Berna Serrano, del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química de la Universidad Carlos III de Madrid, por facilitarnos el acceso a sus laboratorios y a su equipamiento de caracterización.