

Juan Guillermo Mas Ortega

TRABAJO FIN DE GRADO

## **Estimación de la severidad que han sufrido los suelos en incendios forestales mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)**

Tutor: César Guerrero Maestre

Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente

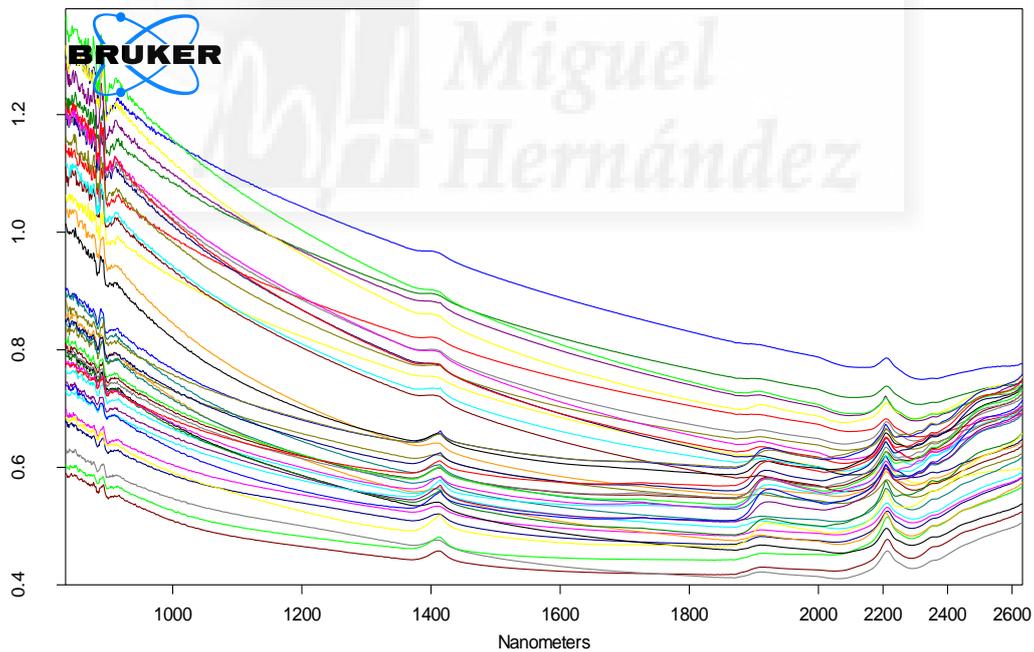
Área: Edafología y Química Agrícola

Grado en Ciencias Ambientales

Facultad de Ciencias Experimentales

Curso 2014/2015

Universidad Miguel Hernández de Elche



## ÍNDICE

1. RESUMEN Y PALABRAS CLAVE.....	3
2. INTRODUCCIÓN.....	4
2.1. NIR como técnica de análisis de suelos.....	4
3. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	5
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
4.1. Muestras.....	6
4.2. Diseño del experimento.....	7
4.3. Calentamiento de las muestra.....	9
4.4. Obtención de los espectros NIR de las muestras de suelos.....	9
4.5. Construcción de los modelos.....	10
4.6. Utilización de los modelos y Predicciones.....	12
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
5.1. Quemados de laboratorio.....	12
5.2. Espectros muestras quemadas.....	13
5.3. Modelos.....	15
5.3.1. Modelo de temperatura máxima alcanzada.....	15
5.3.2. Modelos de tiempo de quemado.....	15
5.3.3. Modelos de severidad.....	17
5.4. Predicciones.....	19
5.4.1. Predicciones de temperatura máxima alcanzada.....	19
5.4.2. Predicciones de tiempo de quemado.....	20
5.4.3. Predicciones de severidad.....	22
5.4.4. Estimar severidad mediante predicciones de temperatura y tiempo.....	24
6. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA.....	25
6.1. Conclusiones.....	25
6.2. Proyección futura.....	25
7. BIBLIOGRAFÍA.....	26

## **1.-RESUMEN Y PALABRAS CLAVE**

### **RESUMEN**

En este trabajo se ha utilizado la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) como técnica para estimar la severidad en suelos quemados. Para ello se han quemado muestras en el laboratorio a temperaturas y tiempos conocidos, y con ellos desarrollar modelos en los que se relacionan los cambios en los espectros NIR con la temperatura máxima, el tiempo de quemado y la severidad. Se desarrollaron 7 modelos a partir de 45 muestras representativas de una misma zona. Además de desarrollar los modelos se ha utilizado un segundo método para intentar estimar la severidad, a través de predicciones de los valores de temperatura y tiempo obtenidos en las modelizaciones anteriores. Los resultados mostraron que se puede estimar la temperatura máxima alcanzada, pero en el caso del tiempo de quemado y la severidad los resultados mostraron que las temperaturas influyen en los errores de predicción.

### **ABSTRACT**

In this work has been used the near-infrared spectroscopy (NIR) as technique to predict the severity in burned soils. For this has been burned in the laboratory samples at known temperatures and times, and they develop models relating changes in the NIR spectra with the maximum temperature reached, the burn time and severity. A total of 7 models were developed using 45 samples representatives from the same area. In addition to developing models we have used a second method to try to estimate the severity, through predictions of temperature and time values obtained from previous modelings. The results showed that can estimate the maximum temperature reached, but in the case of burn time and severity results showed that temperatures affect the prediction errors.

**PALABRAS CLAVE:** Infrarrojo cercano (NIR), temperatura, severidad, modelo.

## 2.-INTRODUCCIÓN

El fuego, como fenómeno natural, ha estado siempre presente en el medio ambiente como uno de los factores importantes que contribuyen a configurar la flora y la vegetación mediterráneas. Desgraciadamente el fuego se ha convertido en un factor de origen antrópico en la mayoría de las veces, y ocurre con una frecuencia e intensidad mucho mayor que cuando era de origen natural (Mataix-Solera y Guerrero, 2008).

El suelo es un componente básico del ecosistema forestal. Puede sufrir cambios directos producidos por el calentamiento, en sus propiedades físicas químicas y biológicas y cambio indirectos después de la pérdida de la cubierta vegetal, de la cubierta de cenizas así como una mayor susceptibilidad a la erosión tanto hídrica como eólica (Mataix-Solera y Guerrero, 2008). Esas alteraciones, pueden retrasar el crecimiento de una nueva cubierta vegetal y por tanto exponer durante más tiempo al suelo frente a los agentes erosivos. Los cambios producidos suelen ser más graves cuanto más severo ha sido el incendio con respecto al suelo.

Evaluar los efectos del fuego sobre el suelo es importante. Para ello, los métodos empleados actualmente suelen resultar costosos, subjetivos y poco precisos. Destaca la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) como técnica rápida para conocer los efectos de un incendio. Los espectros de los suelos obtenidos con el NIR contienen información de los cambios que se han producido, de manera que a través de los espectros podemos conocer, por ejemplo, las temperaturas alcanzadas en los suelos quemados o el tiempo de quemado.

### 2.1.-NIR como técnica de análisis de suelos

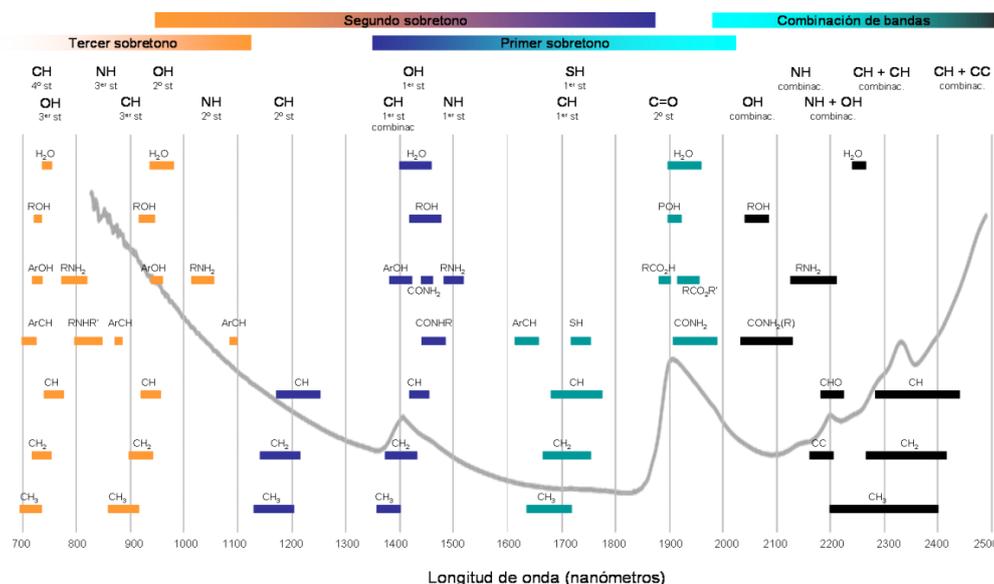
La espectroscopia molecular se basa en la interacción entre la radiación electromagnética y las moléculas. Dependiendo de la región del espectro electromagnético en la que se trabaje, y por tanto de la energía de la radiación utilizada (caracterizada por su frecuencia y su longitud de onda), esta interacción será de diferente naturaleza (excitación de electrones, vibraciones moleculares y rotaciones moleculares). La región del infrarrojo comprende el intervalo espectral que va desde los 780 nm hasta los  $10^6$ nm. Según el fenómeno espectroscópico que provoca la absorción de energía por parte de la materia, podemos subdividir a esta región en tres zonas (Tabla 1): el Infrarrojo cercano (NIR del inglés Near Infrared), el Infrarrojo medio, (MIR, Mid Infrared) y el Infrarrojo lejano o FIR (Far Infrared).

**Tabla 1.** División de la región infrarroja (Burns y Ciurczak, 2008).

Región	Longitud de onda (nm)	Origen de la absorción
NIR	780 – 2500	Sobretonos y bandas de combinación de vibraciones moleculares fundamentales
MIR	2500 – 40000	Vibraciones moleculares fundamentales
FIR	40000 - $10^6$	Rotaciones moleculares

La absorción de la radiación NIR por moléculas orgánicas es debida a sobretonos y bandas de combinación principalmente debidas a enlaces de tipo O-H, C-H, N-H, SH y C=O (Figura 1). Los espectros del NIR son complejos y no se pueden interpretar directamente como ocurre con otras regiones (MIR), ya que está constituido por bandas muy anchas que normalmente están

solapadas. Por lo tanto, es necesario correlacionar la información obtenida de los espectros con la propiedad (analito) de interés.



**Figura 1.** Asignación de la absorción de la radiación en el rango espectral del NIR. La línea gris es el espectro NIR de una muestra de suelo.

Para extraer la información de los espectros obtenidos con el NIR hay que utilizar métodos estadísticos, lo que se conoce como quimiometría. Para realizar un análisis mediante el NIR, es necesario desarrollar modelos que sean capaces de predecir la variable de interés (por ejemplo el tiempo de quemado) en nuevas muestras. Para ello se utiliza un set de calibración, que es un conjunto de muestras que han sido quemadas a tiempos conocidos y de las que se dispone de sus espectros. Tras obtener el modelo, o función de calibración, éste servirá para estimar el tiempo de quemado en nuevas muestras mediante el espectro NIR.

### 3.-ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

El suelo es un elemento fundamental de la biosfera. Por ello son necesarios métodos que analicen los suelos para obtener datos que puedan ser usados con distintos fines, como pueden ser medioambientales, de producción agrícola, de gestión de espacios... para así aminorar o evitar los procesos y riesgos de degradación de los mismos. La obtención de datos requiere que cada día esos métodos sean mejorados, es decir, sean métodos más precisos, eficientes y rápidos. Por tanto la elección de este Trabajo Fin de Grado, es debido al interés en esta técnica de la espectroscopia por reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) en suelos, por sus ventajas y gran potencialidad en suelos quemados, no solo para estimar muchas de sus propiedades (fines analíticos), de manera rápida y barata, sino para utilizarse para otros fines como es la estimación de la severidad que ha alcanzado una muestra de suelo en un incendio.

A pesar de la importancia de la severidad, no se han desarrollado métodos para cuantificarla de manera precisa y exacta. Por ello, es necesario desarrollar un método para poder estimar la severidad del fuego en los suelos mediante NIR. En trabajos previos se observó que podemos estimar mediante NIR la temperatura máxima alcanzada en suelos quemados (Guerrero et al., 2007; 2014) y el tiempo de quemado (Pérez-Bejarano et al., 2010). Esto es importante ya que la severidad no está determinada sólo por la temperatura, también influye el tiempo de quemado.

A continuación exponemos los objetivos concretos de este trabajo, orientados a usar la espectroscopia NIR:

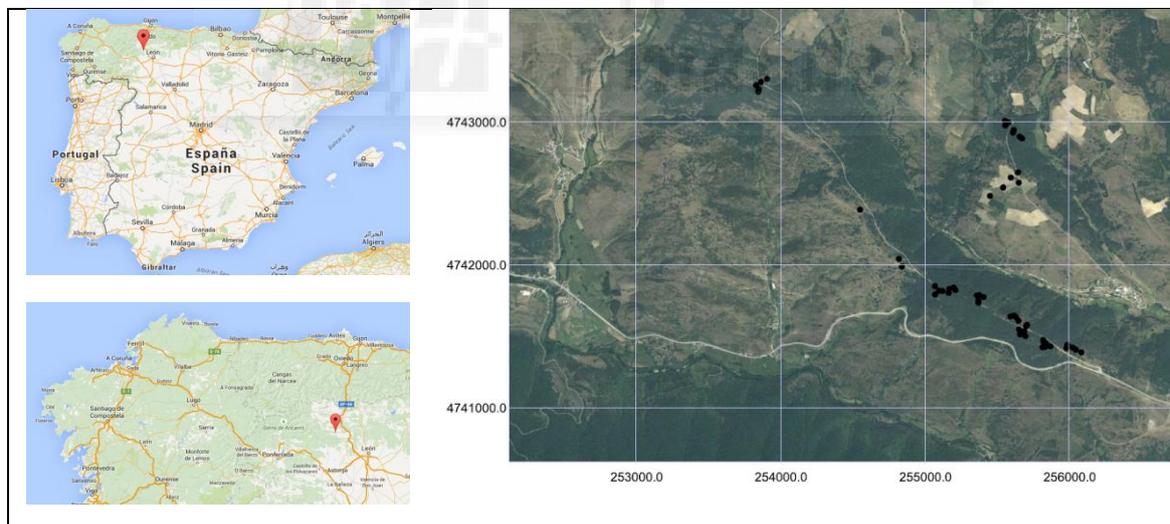
- Desarrollar un modelo que relacione los espectros NIR con las temperaturas máximas alcanzadas (TMA).
- Desarrollar modelos que relacionen los espectros NIR con el tiempo de quemado.
- Desarrollar dos métodos distintos de estimar la severidad: uno a partir de modelos que relacionen los espectros NIR con la severidad directamente, y otro destinado a intentar evaluar sí a partir de predicciones de temperatura máxima alcanzada y el tiempo de quemado podemos estimar la severidad.

## 4.-MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1-Muestras

Para la realización de este Trabajo de Fin de Grado se han empleado 55 muestras de una misma zona (Figura 2), con el fin de captar toda la variabilidad del lugar. Las muestras se tomaron de Riello (León). Las características de la zona son: vegetación *Quercus Pyrenaica*, temperatura media 9,8°C y precipitación media 1100mm. Dichas muestras fueron secadas al aire y tamizadas a 2 mm.

De las 55 muestras totales, con 45 de ellas construiremos los modelos y las otras 10 las utilizaremos para cuantificar la calidad de las predicciones. Estas muestras fueron identificadas como conjunto de verificación.



**Figura 2.** Izquierda: ubicación de la zona donde se obtuvieron las muestras. Derecha: distribución de las muestras en el terreno (Huso 30, ETRS89).

## 4.2.-Diseño del experimento

De acuerdo con los objetivos propuestos se realizaron 3 grupos de modelos diferentes:

a) Modelo temperatura máxima alcanzada. Las muestras se quemarán a diferentes temperaturas: no quemada, 100, 175, 250, 325, 400, 475, 550 y 625°C a periodos de 2-, 5-, 10-, 20- y 30-min (Tabla 2). También decidimos incluir, además de las 40 muestras ya mencionadas, las 75 muestras de la Tabla 3.

**Tabla 2.** Tabla de temperaturas y tiempos de quemado. Para cada combinación, se quemó 1 muestra seleccionada aleatoriamente.

	2 min	5 min	10 min	20 min	30 min	Total
100°C	1	1	1	1	1	5
175°C	1	1	1	1	1	5
250°C	1	1	1	1	1	5
325°C	1	1	1	1	1	5
400°C	1	1	1	1	1	5
475°C	1	1	1	1	1	5
550°C	1	1	1	1	1	5
625°C	1	1	1	1	1	5
Total	8	8	8	8	8	40

b) Modelos de tiempo de quemado: se construyeron 3 modelos de forma independiente para cada uno de los rangos de temperatura (Tabla 3). Para los modelos de tiempo y de severidad las muestras se quemaron a diferentes temperaturas: 150, 325 y 500°C a periodos de 2-, 5-, 10-, 15-, 20-, 25-, 30-, 35-, y 40-min.

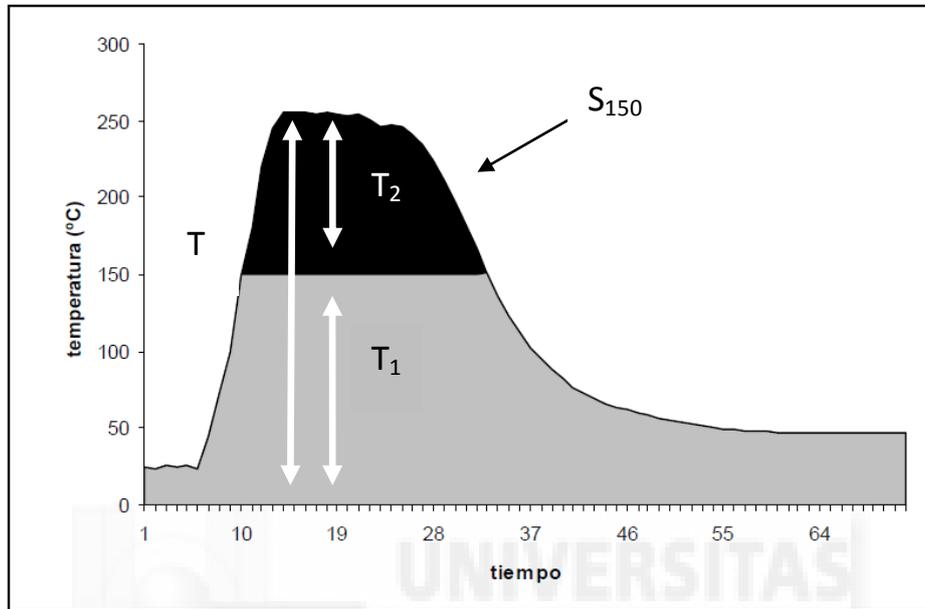
**Tabla 3.** Tabla de temperaturas y tiempos de quemado. Para cada combinación, se quemarán 3 muestras seleccionadas aleatoriamente, excepto las quemadas a 35- y 40-min que se quemarán 2 muestras.

	2 min	5 min	10 min	15 min	20 min	25 min	30 min	35 min	40 min	Total
150°C	3	3	3	3	3	3	3	2	2	25
325°C	3	3	3	3	3	3	3	2	2	25
500°C	3	3	3	3	3	3	3	2	2	25
Total	9	9	9	9	9	9	9	6	6	75

c) Modelos de severidad: para ello definiremos severidad como el área de la curva de temperaturas en el tiempo (Figura 3). El área se va a acotar a 150°C, de manera que obtendremos severidad por encima de 150°C ( $S_{150}$ ), ya que podemos calcular el área gracias a que la temperatura queda registrada cada 3 segundos. Para la obtención de esa área, se usan los valores de temperatura (°C) registrada cada 3 segundos. De este modo, los valores obtenidos se podrían expresar en “°C acumulados”, y a lo largo del tiempo que la muestra ha estado por encima de 150°C. Estos datos serán identificados como  $\sum^{\circ\text{C}} > 150^{\circ\text{C}}$ . Se construyeron 3 modelos, usaremos los datos de las muestras de la Tabla 3:

- I. un modelo para aquellas muestras quemadas a 325°C: el área se acotó a 150°C y que denominamos como  $S_{150\ 325^{\circ\text{C}}}$

- II. un modelo para aquellas muestras quemadas a 500°C: el área se acotó a 150°C y que denominamos como  $S_{150\ 500^\circ\text{C}}$
- III. y un modelo que combina muestras a 325 y 500°C: el área se acotó a 150°C, y que denominamos como  $S_{150\ 325-500^\circ\text{C}}$ .



**Figura 3.** Ejemplo de la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo en una quema de laboratorio, y representación gráfica de la severidad en función de la temperatura que acote. En la imagen la severidad se acota a partir de los 150°C.

d) Estimar la severidad a partir de los valores de temperatura y tiempo estimados: para ello usaremos los valores de temperatura y tiempo que se obtendrán a partir de los modelos que realizaremos en el apartado 4.2.a y 4.2.b, en concreto el modelo para el rango de temperatura 500°C. De este modo se estimaremos la severidad acotada a 150°C en muestras quemadas a 500°C ( $S_{150\ 500^\circ\text{C}}$ ). Se calculará la severidad multiplicando la temperatura máxima alcanzada estimada en el modelo (usaremos el valor de temperatura  $T_2$  acotado a 150°C como se muestra en la figura 3) por el tiempo de quemado estimado en el modelo. Una vez estimada de esta forma la severidad, la compararemos con la severidad real medida por encima de 150°C ( $S_{150}$ ) en las muestras de verificación quemadas a 500°C (Tabla 4).

Las muestras de verificación, usadas para la cuantificar la calidad de las predicciones, se quemaron a diferentes temperaturas: 150, 325 y 500°C a periodos de 2-, 5-, 10-, 15-, 20-, 30-, y 40-min (Tabla 4). Los conjuntos de validación para los modelos de tiempo fueron identificados como 150°C, 325°C y 500°C. En cuanto a los conjuntos de validación de severidad fueron identificados como  $S_{150\ 325^\circ\text{C}}$ ,  $S_{150\ 500^\circ\text{C}}$ ,  $S_{325\ 500^\circ\text{C}}$  y  $S_{150\ 325-500^\circ\text{C}}$ .

**Tabla 4.** Tabla de temperaturas y tiempos de quemado. Para cada combinación, se quemó 1 muestra seleccionada aleatoriamente.

	2 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	40 min	Total
150°C	1	1	1	1	1	1	1	7
325°C	1	1	1	1	1	1	1	7
500°C	1	1	1	1	1	1	1	7
Total	3	3	3	3	3	3	3	21

#### 4.3.-Calentamiento de las muestras

Para construir los modelos será necesario realizar quemas a temperaturas conocidas durante un tiempo determinado. Los calentamientos se llevarán a cabo bajo condiciones controladas en el laboratorio. Las muestras serán de aproximadamente 10 gramos con el fin de conseguir un mínimo gradiente de temperaturas dentro de la muestra debido a que este pequeño volumen será extendido en forma de lámina (algunos milímetros) en el recipiente de aluminio, por lo que la temperatura alcanzada durante la quema en todo el volumen de muestra será más homogénea y la lectura del termopar será más representativa del total de la muestra (Guerrero, 2010).

El recipiente de aluminio (con la muestra quemar) se colocó en un soporte metálico con dos termopares situados cerca de la superficie de la muestra y se introdujo en la mufla. La temperatura obtenida por los termopares fue registrada cada 3 segundos con un data-logger. Los datos registrados fueron volcados a un ordenador donde se identificaron el tiempo y las temperaturas recogidas por los termopares en cada quema.

#### 4.4.-Obtención de los espectros NIR de las muestras de suelos

Una vez enfriadas las muestras, cada una de ellas fueron introducidas en viales numerados (llenando aproximadamente un tercio del vial) con el fin de obtener los espectros NIR (Figura 4, a). Para obtener los espectros de las muestras se empleará el espectrofotómetro FT-NIR (MPA, Bruker) con sensor de PbS (Figura 4, b). Este equipo dispone de un accesorio para realizar medidas de reflectancia difusa entre 12000 y 3800  $\text{cm}^{-1}$ . El software asociado permite ofrecer los resultados como espectros de absorbancia, y en nanómetros (830-2650 nm), con una resolución espectral de 1 nm.

Además el equipo está equipado con un macro muestreador circular y rotativo, permitiendo el escaneado de una amplia área de la muestra. Se realizaron dos lecturas de 64 escaneos (1 minuto) para cada muestra. Para la segunda lectura se agitó el vial con la intención de obtener un espectro lo más representativo posible de cada una de las muestras. El espectro final con el que se trabajará será un espectro promedio de los dos escaneados. Cada espectro NIR de cada muestra queda almacenado como un fichero individual. En este fichero queda almacenado cada uno de los datos de absorbancia (o reflectancia) a las diferentes longitudes de onda en las que el instrumento capta la radiación reflejada.



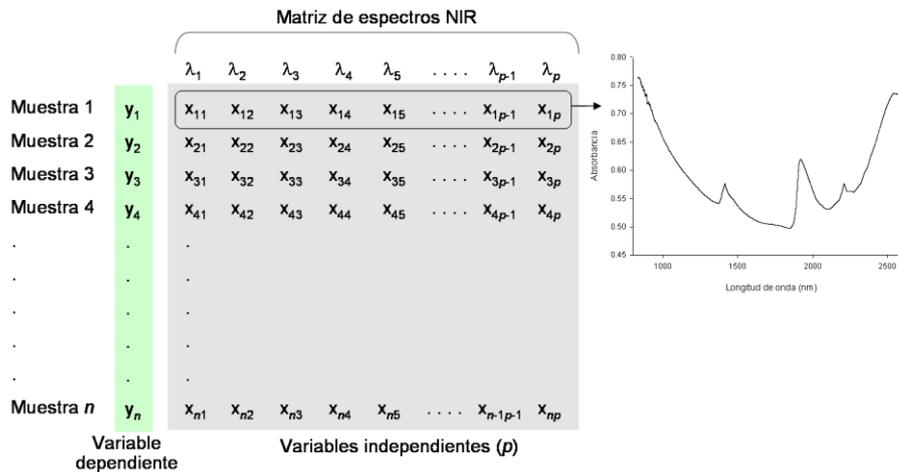
**Figura 4. a)** Las 136 muestras en viales. **b)** Espectrofotómetro NIR empleado en la obtención de espectros.

#### 4.5.-Construcción de los modelos

Para poder sacar la información que contiene un espectro NIR se suele recurrir a aproximaciones empíricas, es decir usando calibraciones (o modelos). En las calibraciones se toma un conjunto de muestras en las que se analiza el parámetro o propiedad de interés ( $y$ ) con exactitud usando métodos de análisis clásicos; además, de ese conjunto de muestras también se dispone de sus espectros NIR ( $x$ ). Ambas fuentes de información constituyen la matriz de calibración (Figura 5). Las muestras se colocan en filas y las variables en columnas.

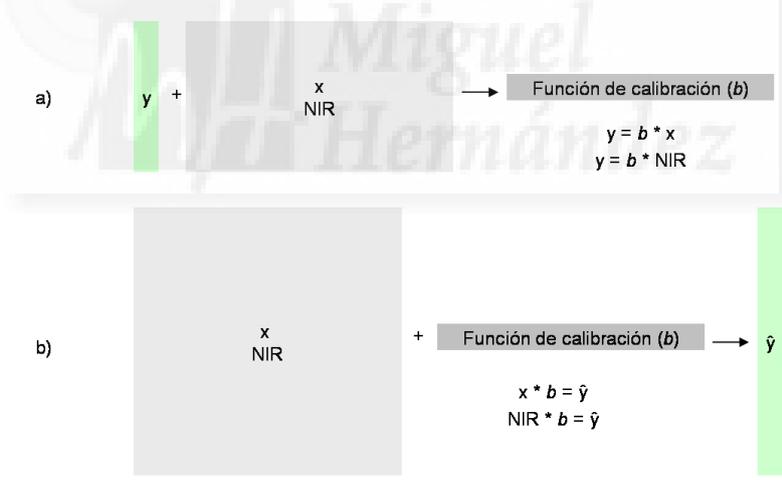
Esta matriz tiene dos partes:

- la variable dependiente ( $y$ ): la propiedad o parámetro de interés (Temperatura máxima alcanzada, tiempo de quemado o severidad). Se tratará de una matriz con  $n$  filas si consideramos  $n$  muestras, y una columna, en donde tendremos el valor de la propiedad de interés para cada una de las muestras del set de calibración.
- las variables independientes ( $x$ ): la matriz de espectros NIR. Se tratará de una matriz de  $n \times p$  dimensiones, considerando  $n$  muestras y por tanto  $n$  espectros. Cada espectro estará constituido por  $p$  valores de absorbancia (o reflectancia) a cada una de las diferentes  $p$  longitudes de onda (que en NIR suelen ser varios cientos). Así, cada fila de esta parte de la matriz constituye el espectro de una muestra. Cada uno de los  $p$  datos de absorbancia (o de reflectancia) de los espectros será una variable independiente ( $x$ ), y por tanto, una columna.



**Figura 5.** Matriz de calibración. Valor de temperatura de las muestras ( $Y_n$ ) frente a los valores de absorbancia de las diferentes longitudes de onda que componen los espectros de las muestras ( $X_n$ ).

Durante el proceso de calibración se relacionan ambos términos (x,y) a través de una función de calibración ‘b’. De manera muy general podemos decir que durante la calibración se busca qué partes de los espectros puede explicar a la variable dependiente (Figura 6, a). Una vez obtenida la función de calibración *b* (ecuación que relaciona espectros y la propiedad de interés), esta función podrá servir para estimar el parámetro ( $\hat{y}$ ) en nuevas muestras a través del espectro NIR (Figura 6, b).



**Figura 6. a)** Esquema del proceso de calibración: durante la calibración se obtiene la función *b* que relaciona ambos términos (x e y). Para obtener esta función, ambos términos deben ser conocidos. **b)** Esquema estimaciones: con posterioridad, la función 'b' servirá para estimar la variable dependiente ( $\hat{y}$ ) en nuevas muestras a través de sus espectros.

Para la construcción de los modelos se realizó primero un preprocesamiento de los espectros obtenidos en el NIR. Asimismo se aplicaron otros preprocesamientos en los espectros como la primera derivada y la normalización vectorial, que redujeron aquellas interferencias ópticas no relacionadas con la composición química de las muestras. Además, la primera derivada aumenta la resolución de los picos de los espectros. Todos estos procedimientos se llevaron a cabo mediante un programa especializado en espectroscopia (OPUS versión 7.0, BrukerOptikGmbH).

#### 4.6.-Utilización de los modelos y Predicciones

Tras obtener los modelos, estos servirán para estimar temperatura, tiempo y severidad en las muestras del conjunto de verificación mediante el espectro NIR. A continuación, con el fin de conocer la precisión de nuestros modelos, se calcularon los valores  $r^2$  (Coeficiente de determinación) ecuación [1], pendiente, constante, RMSEP (del inglés *Root Mean Square Error Prediction*) ecuación [2], bias (refleja el error sistemático del modelo) ecuación [3], SEP (del inglés *Standard Error of Prediction*) ecuación [4] y RPD ecuación [6].

$$r^2 = (1 - \frac{\sum(Differ_i)^2}{\sum(y_i - y_m)^2}) \cdot 100 \quad [1]$$

$$RMSEP = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (Differ_i)^2 / n]} \quad [2]$$

$$bias = \sum_{i=1}^n (Differ_i) / n \quad [3]$$

$$SEP = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (Differ_i - bias)^2 / (n-1)]} \quad [4]$$

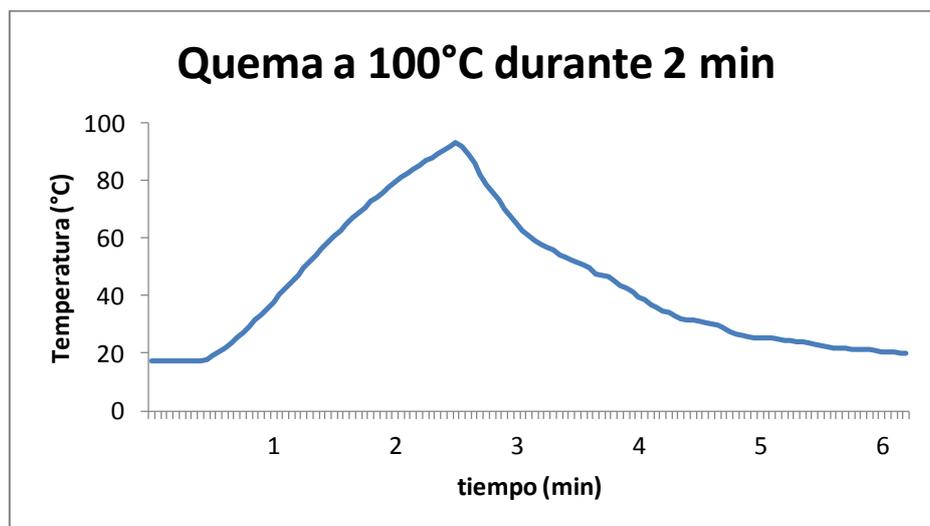
$$\text{Siendo } Differ_i = Y_i^{medido} - Y_i^{predicho} \quad [5]$$

$$RPD = \text{desviación estándar de los datos medidos} / RMSEP \quad [6]$$

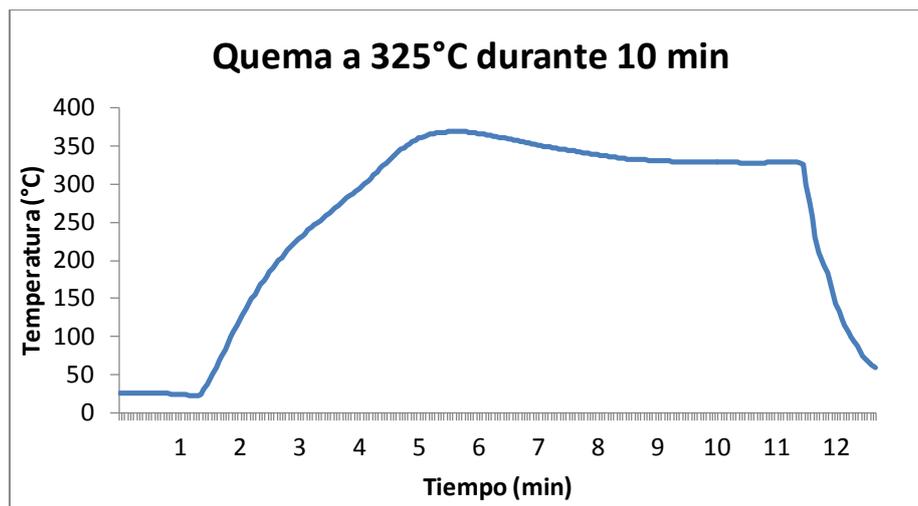
### 5.-RESULTADOS

#### 5.1.-Quemas de laboratorio

En las figuras 7 y 8 se muestran la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo. En la figura 7 mostramos la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo de una quema a 100°C durante 2 min. El periodo de 2 minutos es tan corto y la temperatura de 100°C es tan baja que a la muestra no le da tiempo a alcanzar los 100°C. En la figura 8 mostramos la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo de una quema a 325°C durante 10 min. En torno al minuto 4-5 se aprecia el incremento momentáneo de la temperatura, esto se debe a que el calentamiento desde 220° a 460°C provoca la combustión de la materia orgánica presente en el suelo (Giovannini et al. 1990). Pocos después observamos como la temperatura disminuye hasta al final estabilizarse a 325°C.



**Figura 7.** Ejemplo de la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo en una quema a 100°C durante 2 minutos.



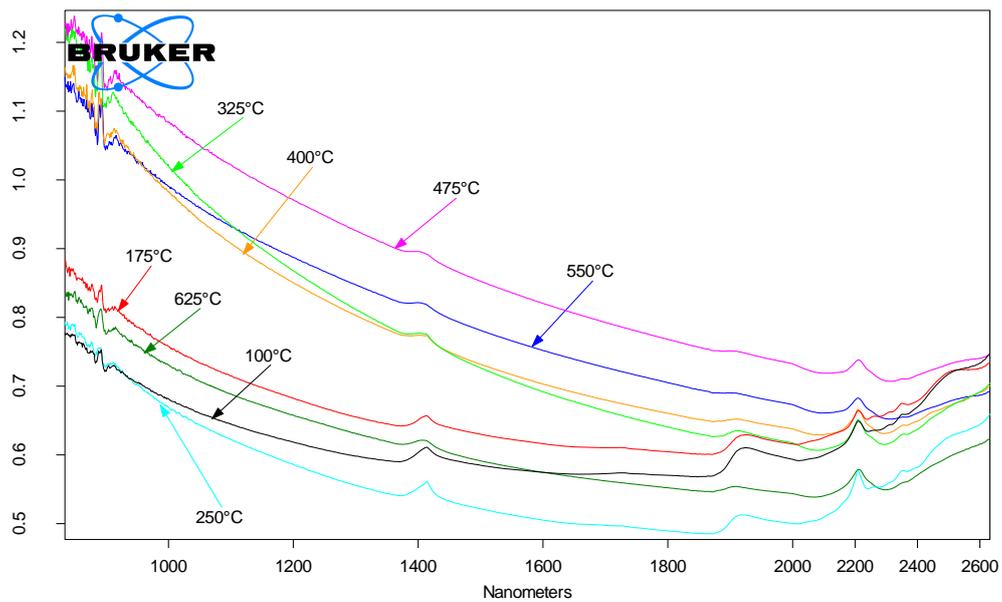
**Figura 8.** Ejemplo de la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo en una quema a 325°C durante 10 minutos.

## 5.2.-Espectros muestras quemadas

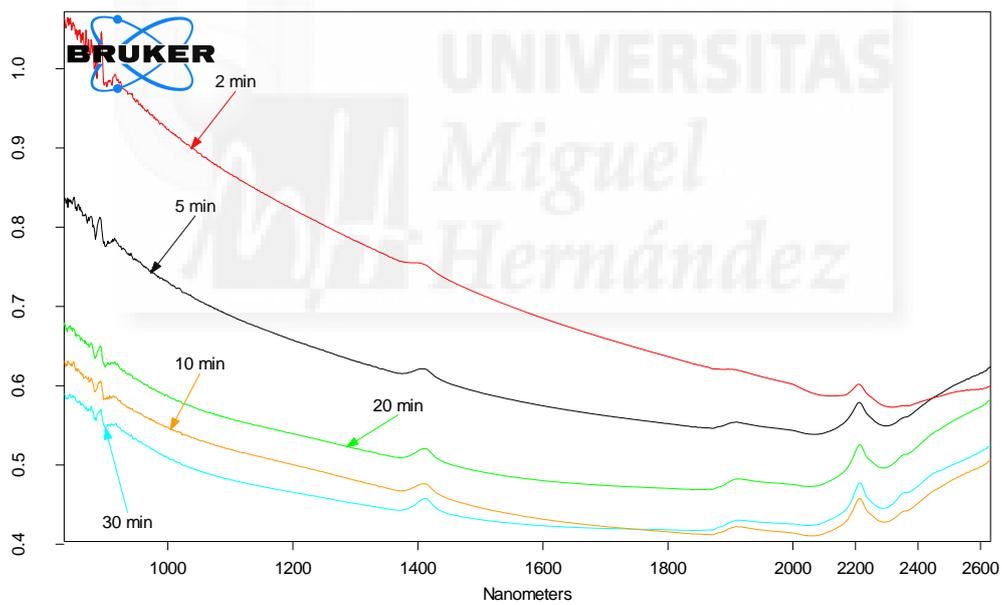
En las figuras 10 se muestran, a modo de ejemplo, cambios en los espectros NIR por efecto de la temperatura. En la figura 9 se muestran cambios en los espectros NIR por efecto del tiempo.

Ciertas temperaturas de quemado producen un oscurecimiento debido a la carbonización de la materia orgánica, lo que provoca que los valores de absorbancia sean más altos a medida que aumenta la temperatura (Figura 9). A medida que se incrementa la temperatura de quemado (o el tiempo de quemado), se va perdiendo este color oscuro al pirolizarse gran parte de los compuestos orgánicos. Provocando que los valores de absorbancia sean más bajos a medida que aumenta el tiempo (Figura 10) (Gonzalez-Perez et al., 2004).

Muchas de las propiedades edáficas que se modifican por efecto del fuego son propiedades que tienen una respuesta espectral en el NIR, o son propiedades que pueden ser estimadas por NIR, de modo que a cada temperatura, se habrán generado unos cambios característicos en los espectros NIR (Figura 9). De este modo, ciertos cambios en los espectros servirán para estimar la temperatura alcanzada. Y por este motivo, podemos usar los espectros para saber la temperatura que se alcanzó de manera retrospectiva (Guerrero et al., 2007). Del mismo modo el calentamiento en función del tiempo (Figura 10) produce cambios en los espectros del NIR (Pérez-Bejarano et al., 2010), pudiendo usar los espectros para conocer el tiempo de quemado.



**Figura 9.** Espectros NIR de muestras de suelos calentadas a diferentes temperaturas durante 5 minutos.

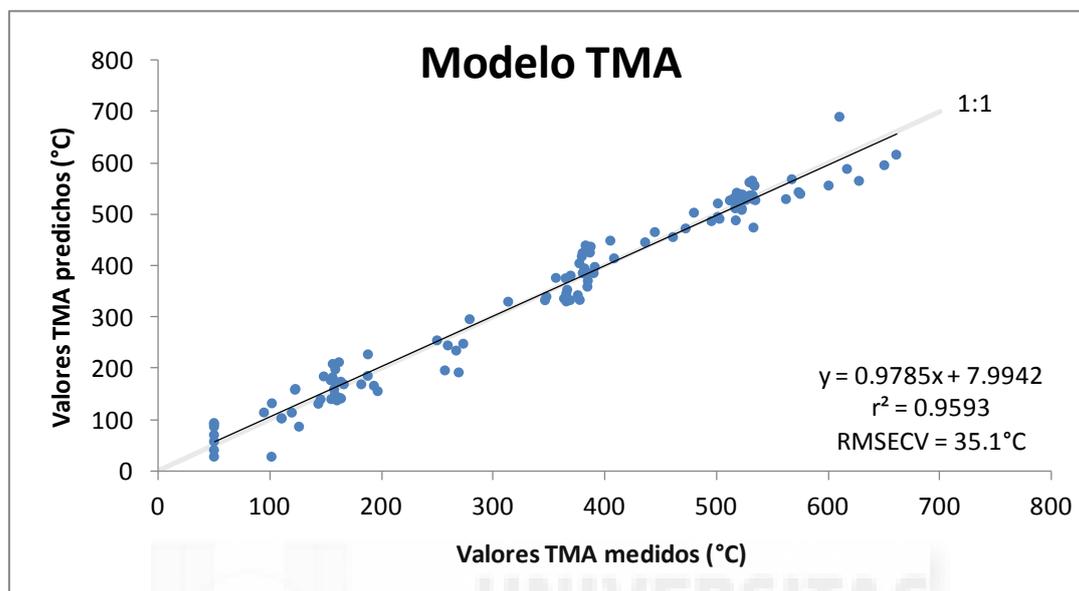


**Figura 10.** Espectros NIR de muestras de suelos calentadas a 625°C durante diferentes tiempos

### 5.3.-Modelos

#### 5.3.1.-Modelo de temperatura máxima alcanzada

Tras realizar la validación cruzada, el valor del  $r^2$  de las calibraciones es de 0,9593 y el RMSECV es de 35,1°C (Figura 11).



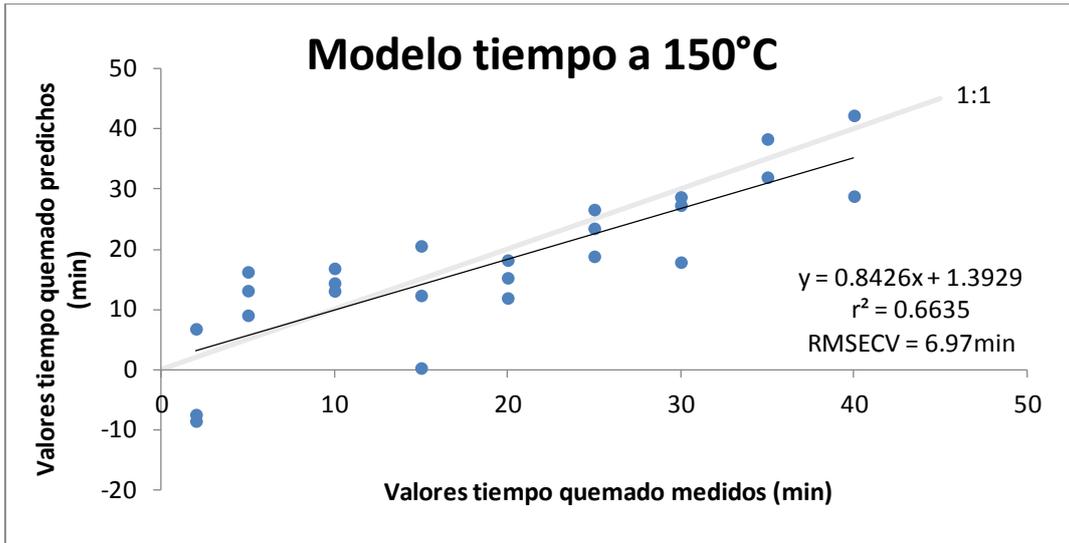
**Figura 11.** Relación entre los valores de TMA medidos y los estimados por el NIR en el modelo.

#### 5.3.2.-Modelos de tiempo de quemado

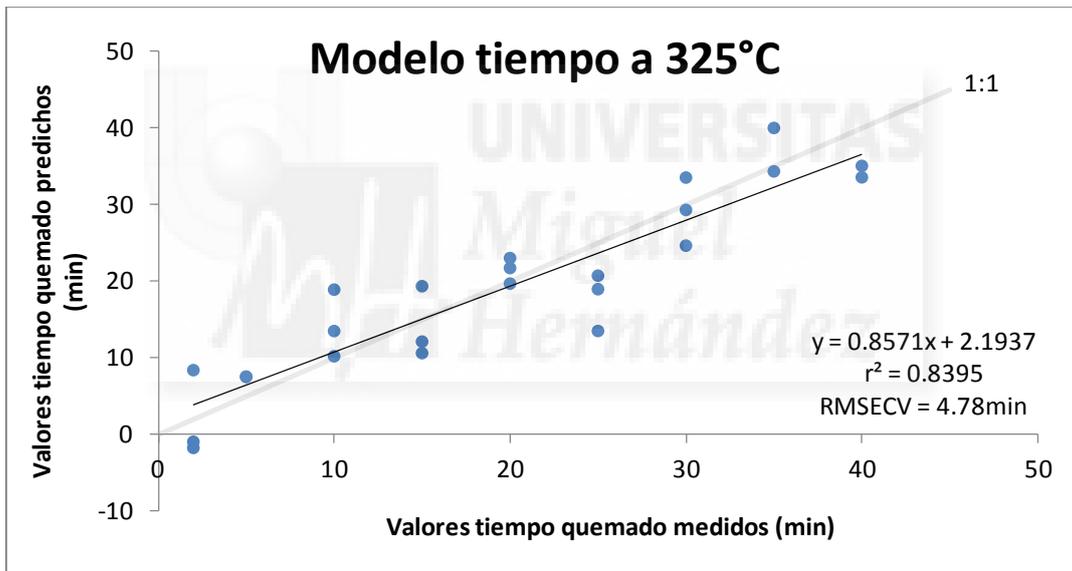
Los modelos mostraron valores de  $r^2$  que se encuentran en un rango que va desde 0,6535 hasta 0,9612, y RMSECV se encuentra entre 2,4 y 6,97min (Figura 12, 13, 14 y Tabla 5).

**Tabla 5.** Resultados de la calibración de los modelos en la predicción del tiempo de quemado en los suelos.

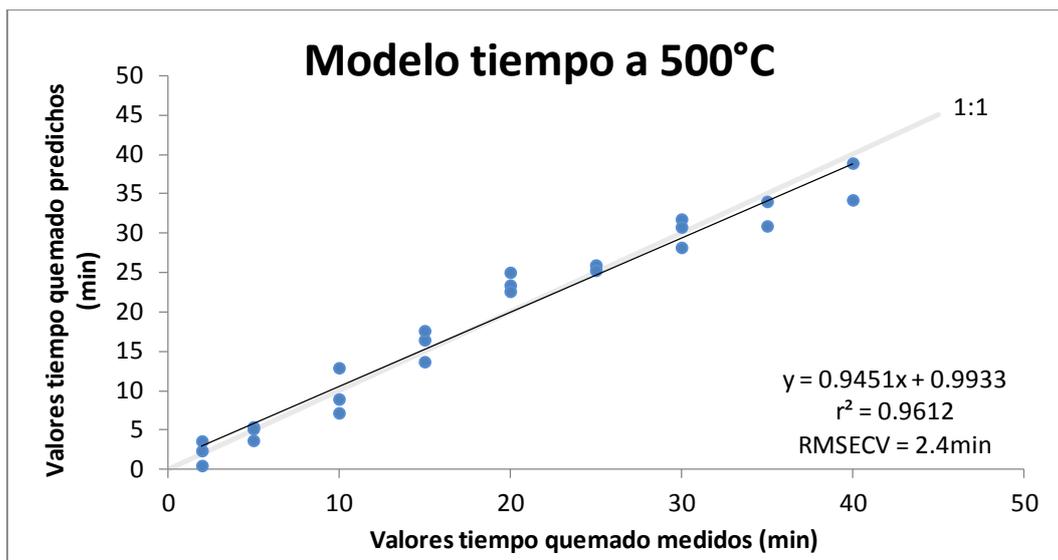
Temperatura	Nº muestras	$r^2$	RMSECV (min)
150°C	25	0,6635	6,97
325°C	25	0,8395	4,78
500°C	25	0,9612	2,4



**Figura 12.** Relación entre los valores de tiempo quemado a 150°C medidos y los estimados por el NIR en el modelo.



**Figura 13.** Relación entre los valores de tiempo quemado a 325°C medidos y los estimados por el NIR en el modelo.



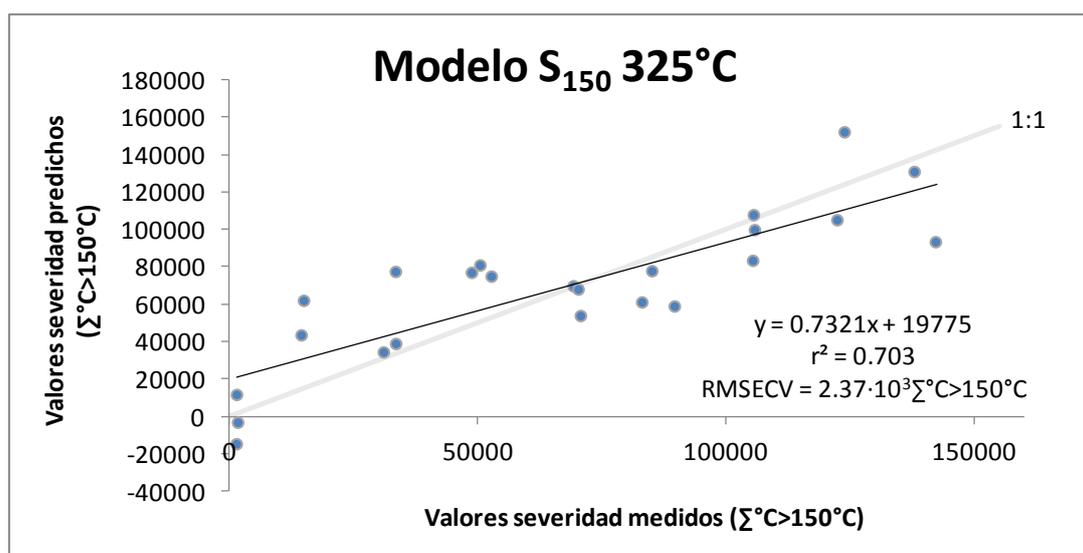
**Figura 14.** Relación entre los valores de tiempo quemado a 500°C medidos y los estimados por el NIR en el modelo.

### 5.3.3.-Modelos de severidad

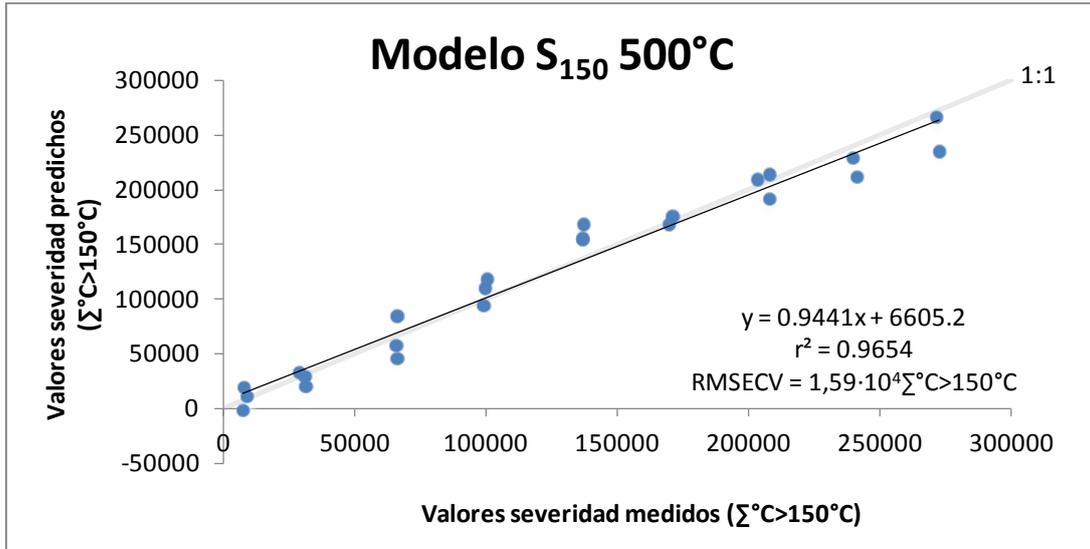
Los modelos mostraron valores de  $r^2$  que se encuentran en un rango que va desde 0,703 hasta 0,969, y RMSECV se encuentra entre  $7,5 \cdot 10^3$  y  $3,19 \cdot 10^4$   $\sum C > 150^\circ C$  (Figura 15, 16, 17 y Tabla 6).

**Tabla 6.** Resultados de la calibración de los modelos en la predicción de la severidad en los suelos.

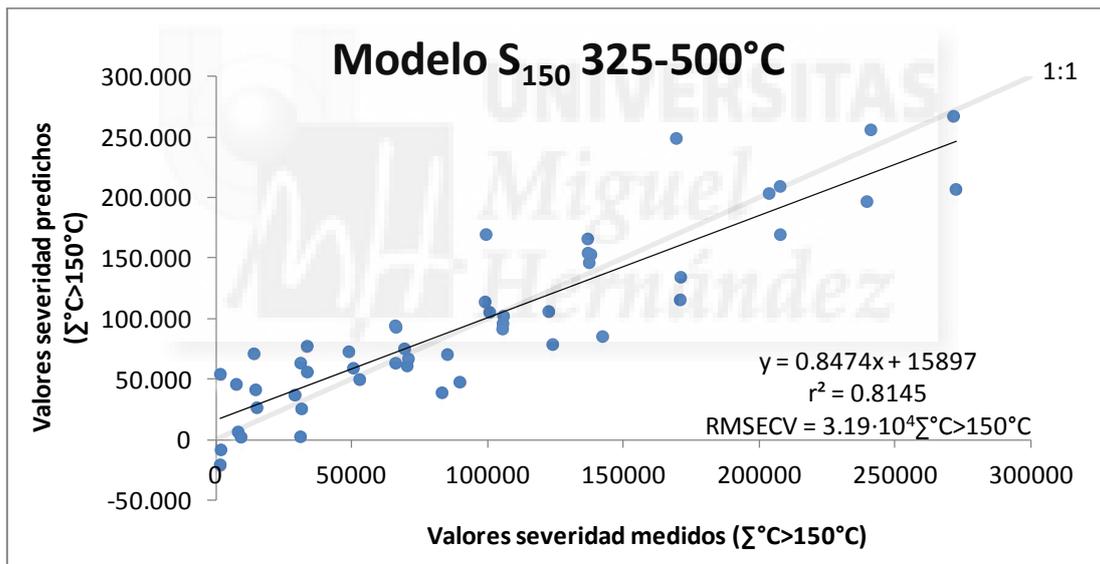
Severidad	Nº muestras	$r^2$	RMSECV ( $\sum C > 150^\circ C$ )
$S_{150} 325^\circ C$	25	0,703	$2,37 \cdot 10^4$
$S_{150} 500^\circ C$	25	0,9654	$1,59 \cdot 10^4$
$S_{150} 325-500^\circ C$	50	0,8145	$3,19 \cdot 10^4$



**Figura 15.** Relación entre los valores de  $S_{150} 325^\circ C$  medidos y los estimados por el NIR en el modelo.



**Figura 16.** Relación entre los valores de s S<sub>150</sub> 500°C medidos y los estimados por el NIR en el modelo.



**Figura 17.** Relación entre los valores de s S<sub>150</sub> 325-500°C medidos y los estimados por el NIR en el modelo.

## 5.4.-Predicciones

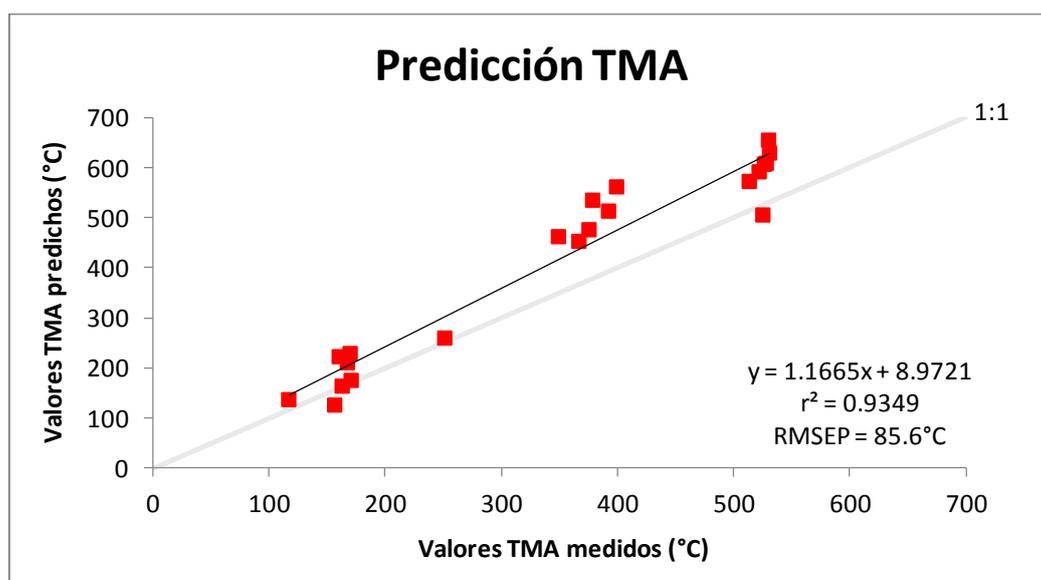
### 5.4.1.-Predicciones de temperatura máxima alcanzada

Los resultados se muestran en la tabla 7 y la figura 18. El valor de  $r^2$  es de 0,9349 y el RMSEP es de 85,6°C. El valor de RPD, 2,86, se puede considerar como aceptable. Valores de RPD por encima de dos se consideran como aceptables pero valores de RPD por encima de 5 se consideran excelentes (Malley et al., 1999). Estos resultados confirman la buena calibración que habíamos observado en el Modelo de TMA (figura11).

De modo que hemos sido capaces de predecir la temperatura máxima alcanzada a partir de los espectros NIR. En otros estudios se ha demostrado que la espectroscopia NIR también puede servir para estimar la temperatura alcanzada en los suelos quemados (Guerrero et al., 2007). El calentamiento de suelos a diferentes temperaturas provoca cambios en sus espectros NIR, los compuestos termosensibles que se encuentran en el suelo modifican los espectros, y estos cambios están relacionados con la temperatura máxima alcanzada. Por tanto cada temperatura va a dejar una 'huella' típica o característica en las propiedades edáficas, y por tanto, también en los espectros (Lugassi et al, 2010). Lo que nos permite desarrollar modelos precisos que relacionen el NIR y la TMA. Aún así hay que tener en cuenta que nuestro modelo de TMA sólo es útil para la zona donde fueron extraídas las muestras, ya que las propiedades y la composición de los suelos es muy variable de un sitio a otro y por tanto para cada zona un modelo de TMA distinto.

**Tabla 7.** Validación del modelo de TMA.

Conjunto de validación	Nº muestras	$r^2$	RMSEP (°C)	bias (°C)	SEP (°C)	RPD
Conjunto de verificación	21	0,9349	85,6	-66,8	54,9	2,86



**Figura 18.** Relación entre los valores de la temperatura máxima alcanzada (TMA) medidos y los estimados por el NIR.

#### 5.4.2.-Predicciones de tiempo de quemado

En la figura 19 y 20 y la tabla 8 vemos los resultados de las predicciones de tiempo a 150 y 325°C. Los valores de  $r^2$  son bajos, entre 0,0882 y 0,2409, y el RMSEP es alto, desde 17.1 a 34,7min. También observamos que los valores de RPD son muy bajos, se encuentran entre 0,561 y 0,785, y por tanto con escasa capacidad de predicción. Las predicciones muestran muy poca precisión y poca exactitud. En las calibraciones que habíamos observado de los modelos de tiempo a 150 y 325°C (Figura 12 y 13) ya se intuía malos resultados en las predicciones.

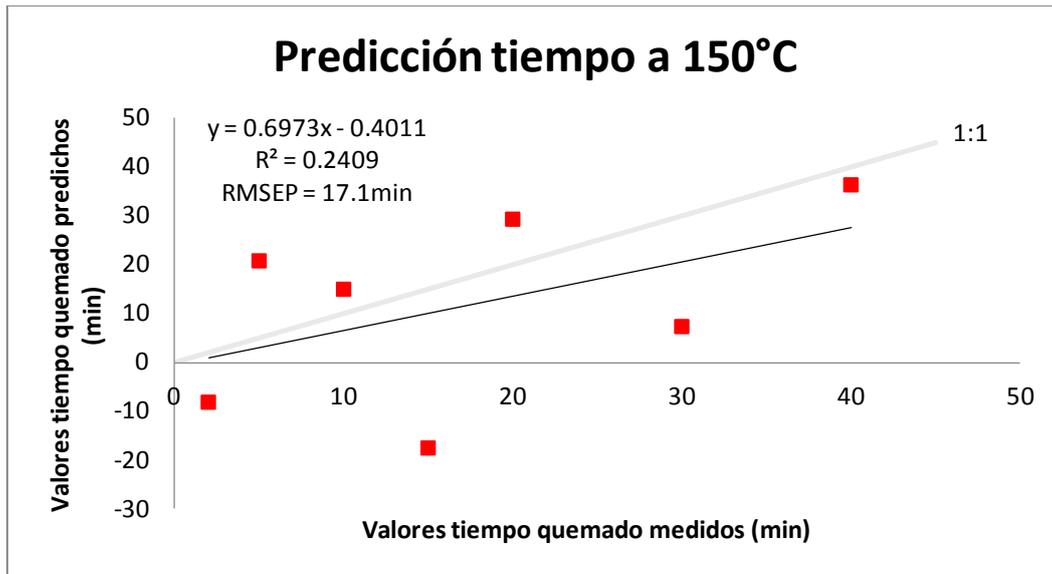
En la figura 21 y la tabla 8 vemos los resultados de las predicciones de tiempo a 500°C. Los valores de  $r^2$  es alto 0,9476, el RMSEP es bajo 3,21min y el RPD es de 4,36, por tanto consideramos las predicciones como aceptables. En la figura 14 ya se apreciaba una buena calibración del modelo de tiempo a 500°C.

Los resultados nos sugieren que a temperaturas medias-bajas los modelos son muy poco robustos. Seguramente debido a que hasta que no se han alcanzado ciertos cambios edáficos, provocados por altas temperaturas, no se aprecia una relación de los espectros NIR con el tiempo de quemado. Pérez-Bejarano et al., (2010) mencionaba que cuanto más altas son las temperaturas de calentamiento, menor será el RMSECV y más alto el  $r^2$ . Aunque los cambios en las propiedades del suelo (compuestos orgánicos en su mayoría) se reflejan en los espectros NIR, las bajas temperaturas pueden no producir cambios apreciables en la materia orgánica del suelo (Pérez-Bejarano et al., 2010). En la figura 9 apreciamos este efecto, los espectro de las muestras quemadas a temperaturas más altas muestran valores de absorbancia mayores, causados por la carbonización de la materia orgánica.

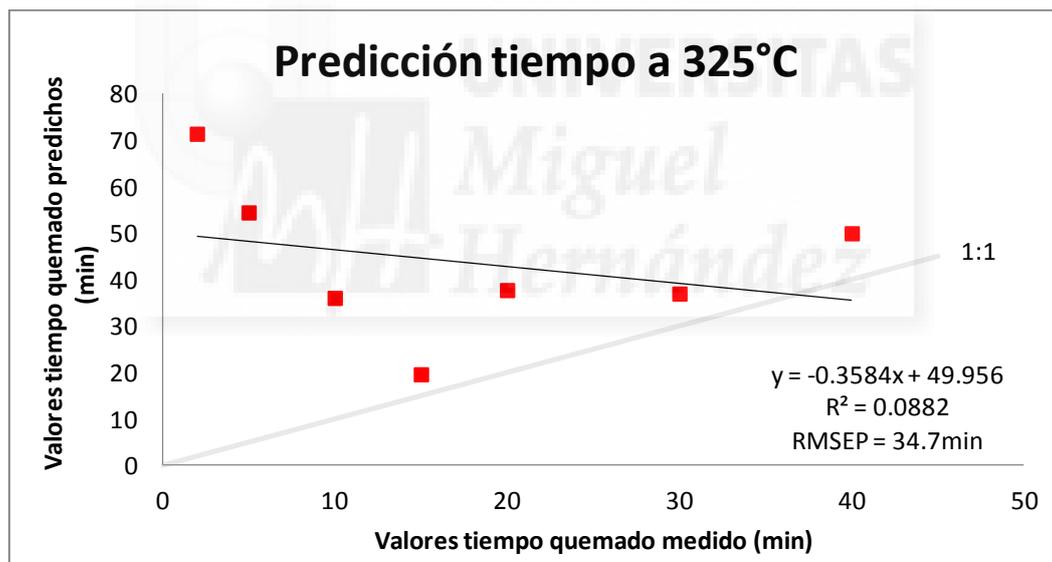
Estos resultados nos permiten desarrollar modelos precisos que relacionen el NIR y el tiempo de quemado. De todos modos, debemos tener en cuenta que el modelo de tiempo a 500°C sólo predice el tiempo en muestra quemadas a 500°C. Por tanto para cada temperatura deberemos realizar un modelo de tiempo de quemado distinto. También será necesario estimar previamente la temperatura máxima alcanzada de una muestra de suelo con el objetivo de seleccionar el modelo de tiempo de quemado correspondiente (Pérez-Bejarano et al., 2010).

**Tabla 8.** Validación de los modelos de tiempo de quemado.

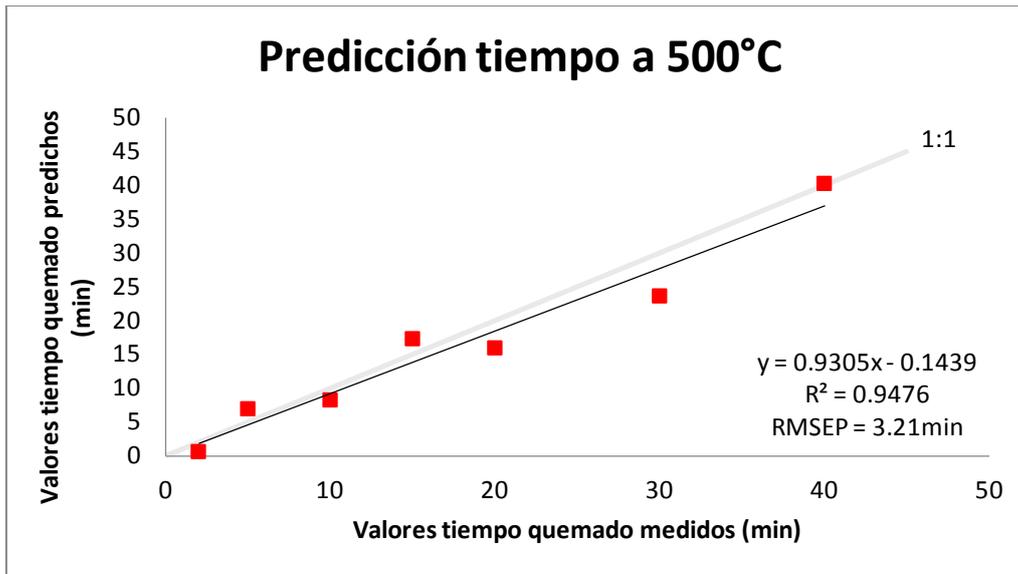
Conjunto de validación	Nº muestras	$r^2$	RMSEP (min)	bias (min)	SEP (min)	RPD
150°C	7	0,2409	17,1	5,68	17,5	0,785
325°C	7	0,0882	34,7	-26,3	24,4	0,561
500°C	7	0,9476	3,21	1,36	3,15	4,36



**Figura 19.** Relación entre los valores de tiempo de quemado a 150°C medidos y los estimados por el NIR.



**Figura 20.** Relación entre los valores de tiempo de quemado a 325°C medidos y los estimados por el NIR.



**Figura 21.** Relación entre los valores de tiempo de quemado a 500°C medidos y los estimados por el NIR.

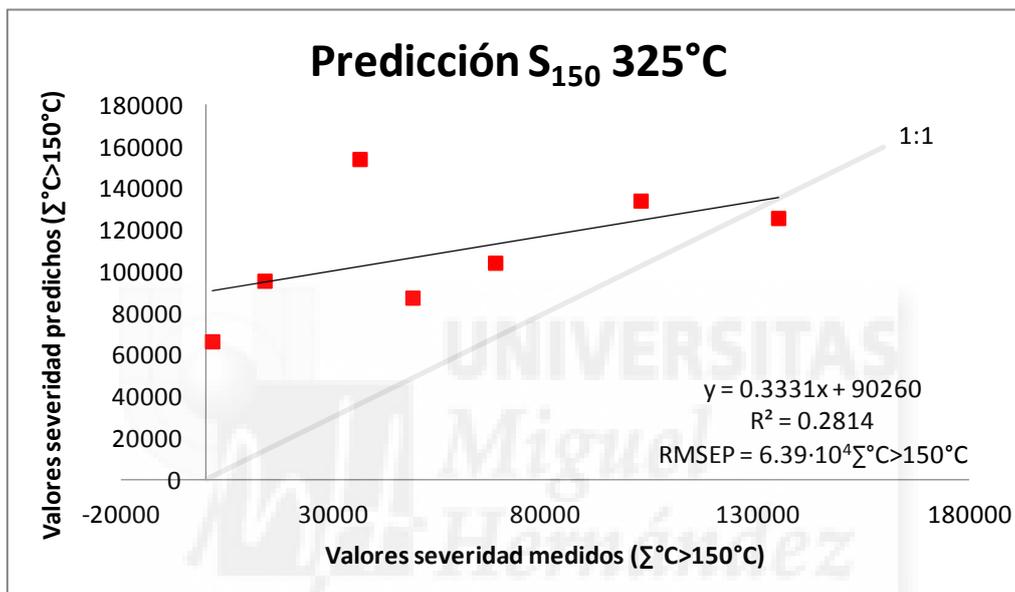
#### 5.4.3.-Predicciones de severidad

En la figura 22 y la tabla 9 vemos los resultados de las predicciones de  $S_{150}$  325°C. El valor de  $r^2$  es bajo, de 0,2814, el de RMSEP es alto,  $6,39 \cdot 10^4 \sum^{\circ}C > 150^{\circ}C$ , y el de RPD es bajo, 1,17, por tanto con escasa capacidad de predicción. En la calibración del modelo de  $S_{150}$  325°C (Figura 15) ya se intuye que los resultados de las predicciones pueden ser malos. En la figura 23 y tabla 9 podemos ver los resultados de las predicciones de  $S_{150}$  500°C. El valor de  $r^2$  es alto, de 0,9472, el de RMSEP es bajo,  $2,28 \cdot 10^4 \sum^{\circ}C > 150^{\circ}C$ , y el de RPD es alto, 4,34, por encima de 4 que consideramos como aceptable. En la figura 16 ya se apreciaba una buena calibración del modelo de  $S_{150}$  500°C. Estos resultados nos sugieren que a temperaturas medias-bajas el modelo es poco robusto. Al igual que en el apartado anterior 5.4.2. debido a que hasta que no se han alcanzado ciertos cambios en las propiedades del suelo, provocados por altas temperaturas, no se aprecia una buena relación de los espectros NIR con la severidad.

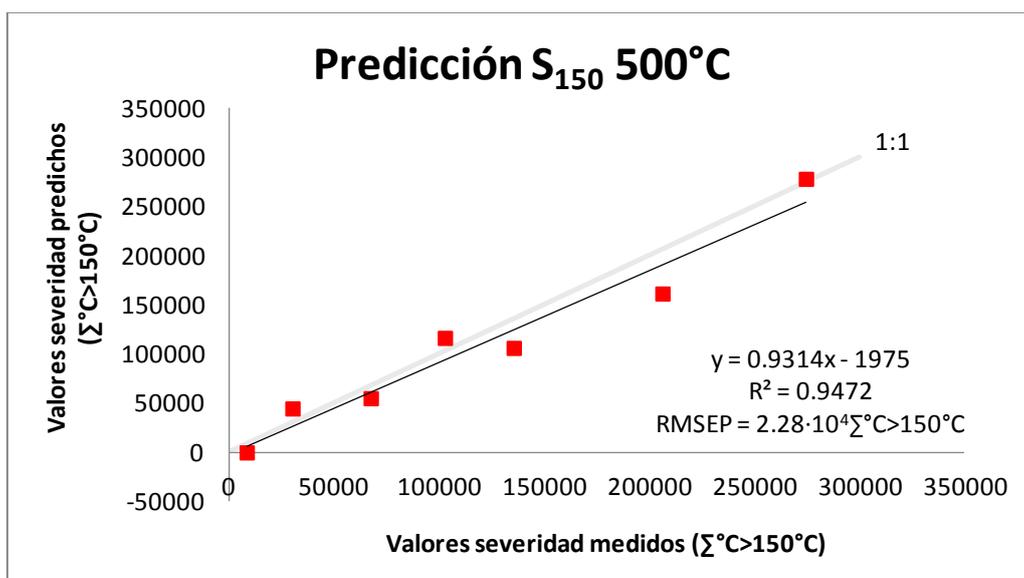
Y en la figura 24 y tabla 9 vemos los resultados de las predicciones de  $S_{150}$  325-500°C. El valor de  $r^2$  no es lo bastante alto, de 0,7461, el de RMSEP es demasiado alto,  $4,47 \cdot 10^4 \sum^{\circ}C > 150^{\circ}C$ , y el de RPD es bajo, 1,98, por debajo de 2 que consideramos como poco preciso. En la figura 17 se intuía que la calibración del modelo de  $S_{150}$  325-500°C no era lo suficientemente buena. Esto puede ser debido sobre todo a la mala precisión en las predicciones de las muestras quemadas a 325°C (Figura 24), que muestran valores de RMSEP mayores que los de las muestras quemadas a 500°C.

**Tabla 9.** Validación de los modelos de severidad.

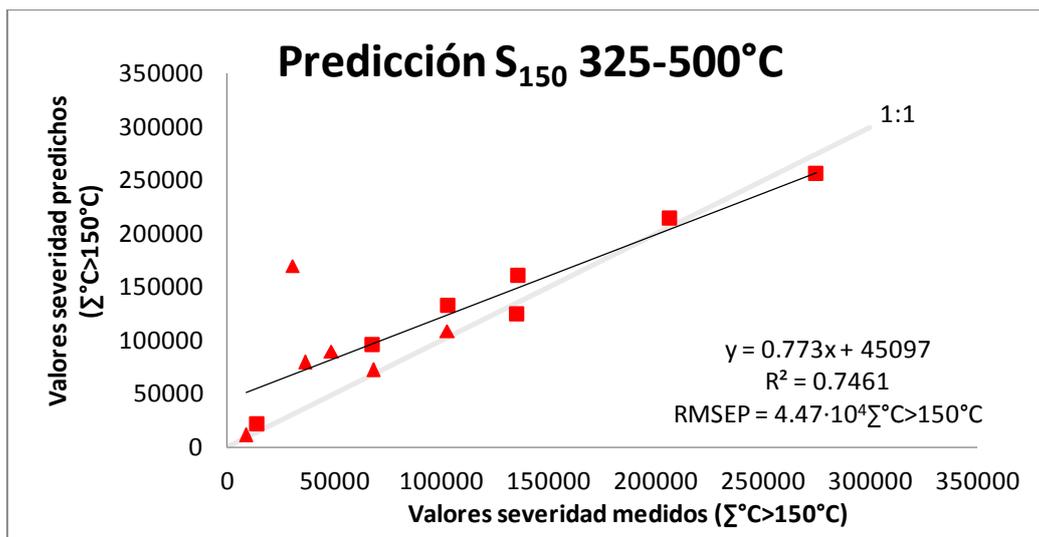
Conjunto de validación	Nº muestras	$r^2$	RMSEP ( $\Sigma^{\circ}\text{C}>150^{\circ}\text{C}$ )	bias ( $\Sigma^{\circ}\text{C}>150^{\circ}\text{C}$ )	SEP ( $\Sigma^{\circ}\text{C}>150^{\circ}\text{C}$ )	RPD
S <sub>150</sub> 325°C	7	0,2814	$6,39 \cdot 10^4$	$-5,15 \cdot 10^4$	$4,08 \cdot 10^4$	1,17
S <sub>150</sub> 500°C	7	0,9472	$2,28 \cdot 10^4$	$1,01 \cdot 10^4$	$2,21 \cdot 10^4$	4,34
S <sub>150</sub> 325-500°C	14	0,7461	$4,47 \cdot 10^4$	$-2,36 \cdot 10^4$	$3,95 \cdot 10^4$	1,98



**Figura 22.** Relación entre los valores de S<sub>150</sub> 325°C medidos y los estimados por el NIR.



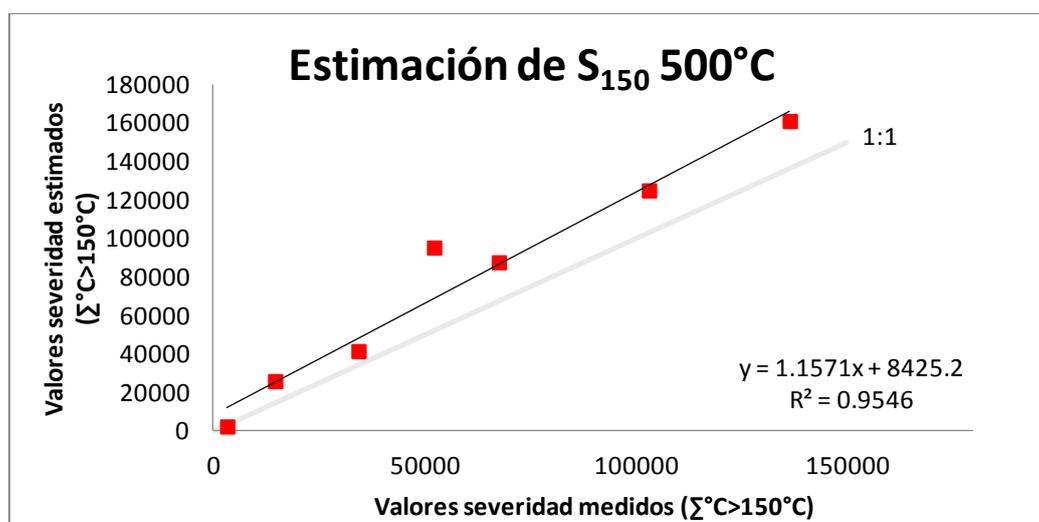
**Figura 23.** Relación entre los valores de S<sub>150</sub> 500°C medidos y los estimados por el NIR.



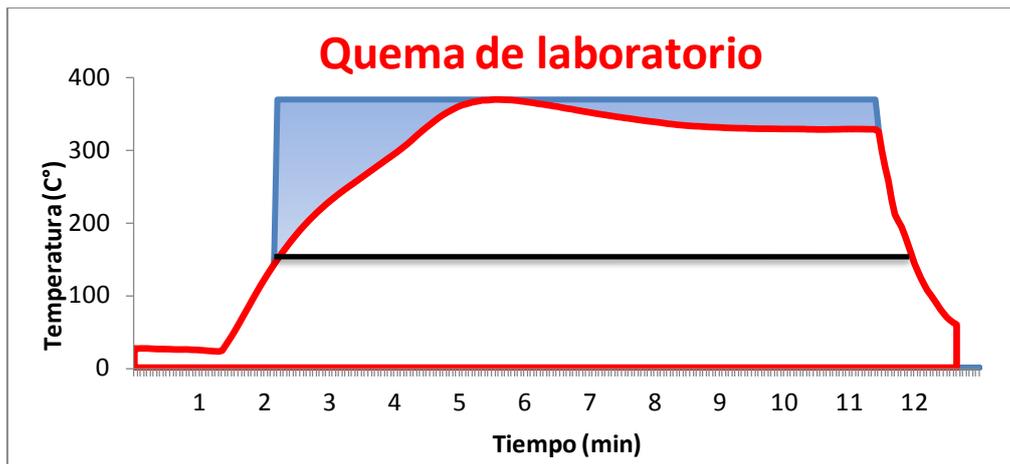
**Figura 24.** Relación entre los valores de S<sub>150</sub> 325-500°C medidos y los estimados por el NIR. Los triángulos hacen referencia las muestras quemadas a 325°C y los cuadrados hacen referencia a las muestras quemadas a 500°C.

#### 5.4.4.-Estimar severidad mediante predicciones de temperatura y tiempo

Los resultados se muestran en la figura 25. Los resultados sugieren buena relación entre la severidad estimada y la real, el valor de  $r^2$  es de 0,9546, presenta alta precisión pero no tanta exactitud. Esta falta de exactitud se debe sobre todo a que los valores de severidad estimada son una aproximación. Ya que como se puede ver en la Figura 26 el valor de la temperatura máxima representa sólo un instante en la quema, la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo es cambiante y no uniforme. De modo que al área acotada por encima de 150°C le hemos incluido el área de color azul (Figura 26), aumentando el valor de severidad estimado. Y no es sólo una aproximación respecto a la temperatura, el valor de tiempo de quemado que hemos usado es una estimación del tiempo de quemado real. Es por esto que los resultados de severidad estimados están por encima de los reales. De modo que es necesario mejorar el método para que sea capaz de captar mejor la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo.



**Figura 25.** Relación entre los valores de severidad medidos y los estimados.



**Figura 26.** Ejemplo de la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo en una quema de laboratorio, en este caso a 325° durante 10min (mostrada en color rojo). La línea negra nos indica la acotación a 150°C. La parte coloreada de azul muestra como sería el área acota a 150°C si usáramos la temperatura máxima como referencia.

## 6.-CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA

### 6.1.-Conclusiones

1. Cuando un suelo sufre el efecto del calentamiento su espectro NIR varía en función de la temperatura máxima alcanzada.
2. El calentamiento en función del tiempo produce cambios en los espectros del NIR, y estos cambios se pueden relacionar con el tiempo de quemado en suelos, aunque solo por encima de ciertas temperaturas.
3. La utilización de modelizaciones para estimar la severidad, aunque sólo por encima de ciertas temperaturas, muestra más precisión que al estimar severidad mediante predicciones de temperatura y tiempo, ya que estos no captan bien la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo. Aún así, en futuros trabajos se deben de pulir los dos métodos para que puedan realizar mejores estimaciones.

### 6.2.-Proyección futura

Una vez se ha obtenido el espectro puede ser utilizado en modelos apropiados para predecir simultáneamente otros parámetros en el suelo (como carbono orgánico, respiración basal, etc...) y de este modo averiguar que factor influye en mayor medida, si la temperatura es el factor más importante, es el tiempo, etc...

Esta técnica ofrece la posibilidad de realizar investigaciones que necesitan un gran número de muestras, por ejemplo las que conciernen a estudios de distribución espacial de las temperaturas de un incendio forestal mejorando el entendimiento de los factores que afectan a este patrón a una escala diferente de la teledetección.

Para un correcto plan de estrategias de rehabilitación y localización de las zonas con mayor prioridad de intervención, es necesario tener mapas de la severidad del incendio y en un periodo

corto de tiempo. Esta tarea necesita analizar muchas muestras y puede ser realizado mediante el uso del NIR a un bajo coste.

El NIR abre nuevas perspectivas sobre los estudios de los efectos del fuego en el suelo, teniendo en cuenta que, generalmente los datos de la TMA de suelos afectados por incendios forestales no están disponibles con suficiente exactitud y precisión.

## **7.-BIBLIOGRAFÍA**

Burns, D.A., Ciurczak, E.W. (2008). Handbook of near-infrared analysis. Third edition. CRC Press (Taylor and Francis Group), Boca Raton, 808 pp.

Giovannini G., Lucchesi L., Giachetti M. (1990). Beneficial and detrimental effects of heating on soil quality. In: Goldammer JG, Jenkins MJ, editors. Fire in ecosystem dynamics: Mediterranean and Northern perspectives. The Hague: Academic Publishing. p. 95-102.

Gonzalez-Perez, J.A., Gonzalez-Vila, F.J., Almendros, G., Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter – a review. *Environment International* 30:855- 870.

Guerrero, C. (2010). Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) para la estimación de las temperaturas alcanzadas en suelos quemados. En: Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales. Editores: Artemi Cerdà y Antonio Jordán. Cátedra de divulgación de la ciencia. Universidad de Valencia.

Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Mataix-Beneyto, J., Gómez, I., (2007). Near-infrared spectroscopy to estimate the maximum temperatures reached on burned soils. *Soil Science Society of America Journal* 71: 1029-1037.

Guerrero, C.; Pedrosa, E.T.; Pérez-Bejarano, A.; Keizer, J.J. (2014). Near infrared spectroscopy to estimate the temperature reached on burned soils: strategies to develop robust models. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 16, EGU2014-16681, 2014.

Lugassi, R., Ben-Dor, E., y Eshel, G. 2010. A spectral-based method for reconstructing spatial distributions of soil surface temperature during simulated fire events. *Remote Sensing of Environment*, 114, 322-331

Malley, D.F., Wray, L.D., Edwards, S. (1999). Application of near-infrared spectroscopy in analysis of soil mineral nutrients. *Communication in Soil Science Plant Analysis* 30:999-1012.

Mataix-Solera, J., Guerrero, C. (2008). Efectos de los incendios forestales en las propiedades edáficas. En: *Incendios Forestales, Suelos y Erosión Hídrica*. Pp: 5-40. Ed. Caja de Ahorros del Mediterráneo ISBN: 978-84-7599-194-8.

Pérez-Bejarano, A., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Mataix, J., Bárcenas, G.M., Soriano-Disla, J.M. (2010). The use of near infrared spectroscopy to estimate fire residence time. En: *FUEGORED 2010. Jornadas Internacionales. Investigación y gestión para la protección del suelo y restauración de los ecosistemas afectados por incendios forestales*. ISBN: 978-84-8408-583-6. pp. 273-276