

Viabilidad de detección de contaminación por plomo en suelos mediante termografía de pulso largo

Feasibility study of Pb-Pollutant detection in soils by step-heating thermography

Rafael HIDALGO-GATO ⁽¹⁾, Luis GONZÁLEZ DE ULLOA ⁽²⁾, Jose Ramon ANDRÉS ⁽¹⁾,
Silvia MARTÍNEZ ⁽²⁾, Alberto PÉREZ ⁽²⁾, Francisco J. MADRUGA ⁽¹⁾, Jose M. LÓPEZ-
HIGUERA ⁽¹⁾.

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, E.T.S.I.I.T. Av. De Los Castros s/n 39005 Santander, Cantabria, España
2. P.I.T.Knowledge, c/Fandería 2, Barakaldo 48901, Bizkaia, España

Persona de contacto: Optoel (hidalgor@unican.es)

RESUMEN:

Este trabajo presenta un estudio de viabilidad en la detección de contaminantes en suelos mediante el empleo de técnicas de medida por termografía infrarroja activa. Este estudio propone un método alternativo a las técnicas actuales de detección e identificación de suelos contaminados mediante ensayos no destructivos que permitan reducir los costes y tiempo de ejecución necesario para la detección de los contaminantes. Para ello, se ha empleado como técnica de medida la termografía de pulso largo. Partiendo de los modelos térmicos establecidos para el análisis de suelos se aplican diversos métodos de pre-procesado a las secuencias termográficas obtenidas para caracterizar la respuesta térmica del suelo. A partir de estos datos se emplean redes neuronales artificiales (ANN- Artificial Neural Networks) como herramienta de análisis que permita discernir la presencia o no de contaminantes.

Palabras clave: Termografía infrarroja, modelo térmico del suelo, redes neuronales artificiales

ABSTRACT:

A feasibility study of the detection of pollutants in soil with thermographic measurement techniques is presented in this paper. This study proposes an alternative method to current techniques for detection and identification of contaminated soils by non-destructive testing to reduce costs and the required execution time. For this purpose, step-heating thermography is used as measurement technique. Taking into account the soil thermal models, different pre-processing methods are applied to the captured thermogram sequences to characterize the soil thermal response data; and Artificial Neural Networks (ANN) are used as a processing tool to discern the presence or absence of contaminants in soil.

Key words: Infrared thermography, Soil thermal model, Soil by infrared, Artificial neural network

1.- Introducción

Las técnicas de análisis térmico de suelos se basan en el estudio del comportamiento térmico de los materiales que lo componen, así

como, en los cambios producidos en su estructura y composición química.

La complejidad de estas técnicas para la detección e identificación de suelos contaminados hace necesario el estudio de técnicas

alternativas que permitan simplificar estos procesos. Estas técnicas requieren procesos altamente costosos, que implican la realización de perforaciones para el muestreo de suelo, así como, la recolección, identificación y conservación de las muestras.

Por lo cual, la detección de contaminantes mediante termografía infrarroja realizando medidas rápidas, fiables y sin contacto, permitiría disminuir los costes y el tiempo consumido para el mismo. En este trabajo se presenta un estudio de viabilidad basado en técnicas de medida por termografía infrarroja.

En este artículo se emplea una técnica termográfica activa, como es la termografía de pulso largo (step-heating thermography) [1-4] para el estudio de viabilidad de la detección de contaminantes en suelos aplicando redes neuronales artificiales [5,6].

En el apartado 2 de esta comunicación se presenta el modelo matemático que caracteriza la transferencia térmica en los suelos. Este modelo depende de las condiciones de contorno y de las características físicas y térmicas del suelo. Conocer a fondo este modelo permite la correcta interpretación de los procesos y resultados obtenidos. A continuación en el apartado 3 se describen la técnica de termografía infrarroja de Step heating que se va a utilizar. Posteriormente en el apartado 4 se describe con detalles la Termografía de Pulso Largo, técnica utilizada en este trabajo, detallando los métodos de pre-procesados y procesados de las imágenes utilizados en los ensayos. En el apartado 5, se detalla el empleo de Artificial Neural Network (ANN), herramientas que debido a su capacidad de aprendizaje, su robustez y la flexibilidad en su programación por ordenador, permiten a los resultados (obtenidos mediante termografía activa infrarroja) adaptarse adecuadamente a las necesidades de procesado permitiendo identificar la presencia de contaminante en las muestras. Se muestra una visión general del comportamiento de las ANN especificando las seleccionadas a emplear en este trabajo, mostrando por último los resultados obtenidos.

2.- Formulación del modelo térmico del suelo

El suelo es un sistema abierto, dinámico, constituido por tres fases. La fase sólida, que está formada por componentes inorgánicos y orgánicos, que dejan un espacio en el que se hallan las fases líquida y gaseosa. La fase líquida, está compuesta principalmente por agua que puede llevar iones y sustancias en solución o suspensión, por aire y por las raíces y organismos que viven en el suelo. La fase gaseosa contiene principalmente oxígeno y dióxido de carbono. Todos estos elementos le dan al suelo sus propiedades físicas y químicas [7]. Para el modelado térmico, por simplicidad, se hace uso de la suposición de que el suelo es isotrópico y homogéneo, es decir, sus propiedades térmicas son constantes. Además, también se asume que la interface aire-suelo (la superficie del suelo) es plana, y la variación del contenido de humedad del suelo en el volumen de las muestras es insignificante durante el período de análisis (las muestras son almacenadas en una cámara climática para garantizar las mismas condiciones en todas las muestras y el contenido de humedad es medido antes de cada ensayo). Tampoco se toma en cuenta la presencia de vegetación o hierba en el suelo. El modelo térmico propuesto se presenta para suelos descubiertos sujeto a condiciones de contorno conocidas. Tanto el suelo como los contaminantes presentes en el mismo serán modelados como sólidos isotrópicos. El volumen de suelo se modela como un volumen cúbico (Ω) con una interface suelo-superficie (Γ), compuesto por diversos procesos físicos. Este modelo está dado por la ecuación de calor de fase simple en el tiempo [8] como se muestra en la ecuación de (1).

$$\frac{\delta T}{\delta t}(x, y, z, t) - \alpha \Delta T(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

$$\text{con } \alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{k}{C_a}$$

donde ρ [kg/m³] es la densidad, c_p [J/kgK] el calor específico, k [W/mK] la conductividad térmica, C_a [J/m³K] la capacidad calorífica volumétrica, α [m²/s] la difusividad térmica y T [K] la distribución de temperatura en el sólido.

Con el fin de resolver el sistema es necesario considerar las siguientes condiciones de contorno: el flujo de calor a través de la porción del contorno del suelo accesible para las medidas, el intercambio a través de los otros contornos (se asume como nulo), la distribución inicial de temperaturas en el suelo y la condición de profundidad del suelo (se asume que la temperatura a una cierta profundidad permanece constante). El flujo térmico se establece por la transferencia de calor por convección y radiación y se introducen a través de la condición de contorno en la interfaz suelo-aire como se muestra en la ecuación 2.

$$q_{net} = q_{sun}(t) + q_{rad}(t) + q_{cov}(t) \quad (2)$$

donde q_{net} es el flujo neto de calor en la dirección normal a la superficie accesible del suelo para las mediciones, q_{sun} es la radiación solar incidente; q_{rad} es el término de transferencia de calor debido a la radiación que incluye la radiación de onda larga de la atmósfera (q_{sky}) y la emisión del cuerpo de la superficie del suelo (q_{soil}) [9], y q_{conv} es la transferencia de calor sensible de la tierra a la atmósfera debido a la convección.

Como se muestra, el proceso de transferencia de calor entre el suelo y la atmósfera es un problema complejo que involucra una cantidad importante de variables físicas. Sin embargo, en situaciones prácticas se puede medir un registro de las temperaturas que participan, lo que evita la estimación de los parámetros.

3.- Termografía infrarroja de pulso largo

En la termografía de pulso largo (Step-heating thermography) el análisis del proceso de transferencia de calor en el sólido bajo inspección se realiza en su estado transitorio. Para ello se excita la superficie del sólido con una fuente de calor (o frío) durante varios segundos mientras se observa la evolución de la temperatura superficial. Pasado el tiempo de duración del pulso, que es mucho mayor que el de la termografía pulsada (en el rango de segundos o minutos), tiene lugar el proce-

so de enfriamiento del material que es igualmente almacenado [1,3].

Considerando un sólido isotrópico semi-infinito, la formulación de la transferencia de calor puede expresarse como en la ecuación 3[10]:

$$T(t) = F(t) - P(t) \cdot F(t - \tau) \\ F(t) = \frac{2 \cdot Q}{k} \sqrt{\frac{\alpha \cdot t}{\pi}} \quad (3)$$

donde $F(t)$ es la respuesta térmica debida a una excitación plana continua de la superficie y k , Q y α son la conductividad térmica, la energía absorbida por la superficie y la difusividad térmica respectivamente (igual que en la ecuación 1) Y $P(t)$ es la función escalón de duración del pulso. La duración del pulso de calor establece diferencias en las condiciones de contorno en las que se producen los procesos de calentamiento y enfriamiento. Así, usando como excitación un frente térmico de calor puede lograrse un calentamiento superficial muy similar para ambos métodos, pero el instante en el que el enfriamiento empieza y la distribución térmica en el interior del material será muy diferentes. En la termografía pulsada, cuando cesa la excitación superficial el resto del espécimen permanece a una temperatura uniforme, mientras que en el caso de la termografía de pulso largo existe ya un gradiente de temperatura cuando la excitación termina. Estas condiciones cambian por completo el modelado de los procesos de transferencia de calor y, en consecuencia, el análisis del material [1].

4.- Setup, muestras y medidas

En este trabajo se ha empleado la termografía de pulso largo con el objeto de obtener una respuesta adecuada para ser analizada y, posteriormente, obtener valores característicos de cada tipo de muestra contaminada (muestras de suelo con diversos niveles de contaminación por plomo). Las muestras empleadas siguen la distribución siguiente:

- Muestra 0: sustrato únicamente (muestra de tierra limpia), (peso 500g).

- Muestra 1: 3 muestras con concentraciones bajas de plomo, 150 mg de plomo/kg de tierra, (peso 500g).
- -Muestra 2: 3 muestras con concentraciones medias de plomo, 500 mg de plomo/kg de tierra, (peso 500g).
- -Muestra 3: 3 muestras con concentraciones altas, 1000 mg de plomo/kg de tierra, (peso 500g)

Antes de cada ensayo, el contenido de humedad de las muestras fue medido, obteniendo resultados entre 52% y 54%, para asegurar su no influencia en las medidas.

Los datos obtenidos a nivel de superficie por la cámara infrarroja son almacenados como un conjunto de imágenes infrarrojas que luego son empleadas para analizar el comportamiento térmico de las muestras [10].

4.1.- Configuración de los ensayos

En la figura 1 se muestra la configuración de los ensayos empleando termografía activa de pulso largo para el análisis de las muestras de suelo contaminado mencionadas anteriormente.

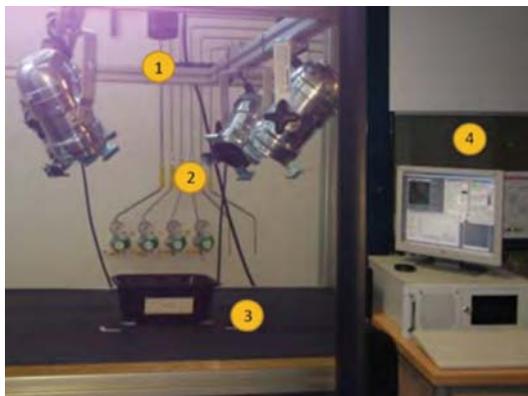


Fig. 1: Configuración empleada en los ensayos mediante termografía de pulso largo.

Como se muestra en la figura 1, las muestras de tierra (3) se excitan mediante 4 focos Flash PAR-36L/S (2) de 250 W de potencia, centrados respecto a la muestra con una separación de 0.46 m a una altura de 0.5 m. Las secuencias termográficas son capturadas a través de una cámara termográfica Thermo-sensorik CMT 128 SM (1), trabajando en un ancho de banda de 1.5 a 5 μm , situada a una altura de 0.6 m respecto a la muestra. Ésta se encuentra conectada a una unidad de captura y procesamiento de datos (4).

En la figura 2 se muestra la curva de la respuesta térmica de una muestra de la secuencia de imágenes termográficas obtenidas mediante termografía activa de pulso largo, donde se puede apreciar la etapa de calentamiento y de enfriamiento. Para eliminar las reflexiones adversas debido a la radiación ambiental, se aplica a la secuencia de termogramas obtenidas una corrección de ruido de patrón fijo. Para esta corrección se emplea un termograma promedio resultante de los 10 primeros termogramas obtenidos previo al pulso de calor [11].

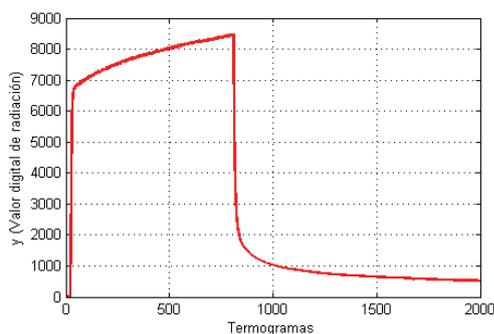


Fig. 2: Evolución térmica promedio de la secuencia de datos.

4.2.- Resultados del pre-procesado

Este estudio se centra en la etapa de calentamiento de la respuesta térmica, en particular en la rampa de calentamiento correspondiente al inicio del mismo, acotado a un segundo (rango de tiempo del ensayo). Debido a este corto intervalo de tiempo, se emplea una velocidad de captura de la cámara termográfica de 600 FPS.

A partir de la formulación descrita en el apartado 3 y dado que el estudio se realiza con $z=0$, puesto que la radiación se genera por la temperatura en la superficie, se obtiene la ecuación 4 simplificada

$$T(0, t) = cte_1 + cte_2\sqrt{t} \quad (4)$$

Que se modula con un polinomio de grado 6 como se muestra en la ecuación 5 .

$$f(x) = Ax^6 + Bx^5 + Cx^4 + Dx^3 + Ex^2 + Fx + G \quad (5)$$

De este modelo polinómico se obtienen las variables de entrada para el procesamiento posterior.

5.- Red neuronal artificial. Aplicaciones y resultados.

Las redes neuronales artificiales (ANN) son herramientas de procesado muy útiles para solucionar problemas complejos gracias a sus características, como la robustez, paralelismo o capacidad de generalización y aprendizaje [4,12]. De todas las redes utilizadas en el estudio realizado se han seleccionado finalmente dos configuraciones: la primera de ellas compuesta por una capa oculta simple de cuatro neuronas (figura 3a) y la segunda, con una capa oculta doble formada por cuatro y dos neuronas respectivamente (figura 3b).

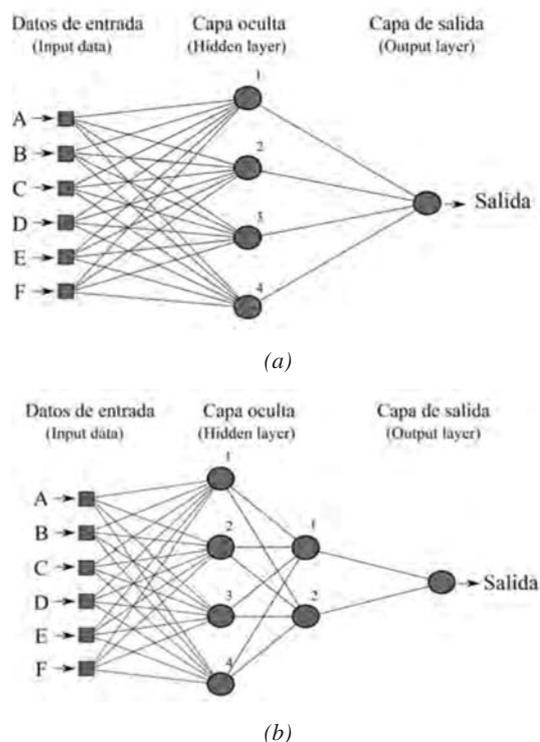


Fig. 3: Redes neuronales artificiales utilizadas en el estudio.

Como parámetros de entrada a las redes neuronales se han introducido los coeficientes del polinomio de ajuste de la respuesta térmica obtenida durante los ensayos. El coeficiente independiente del ajuste realizado, G, no se tiene en cuenta puesto que no aporta información relevante. Dichas redes proporcionan un único parámetro de salida. Este tomará valor positivo en caso de que se estime que el suelo está contaminado y, valor negativo en caso contrario.

Los parámetros importantes para evaluar la viabilidad del método son los denominados falsos positivos y falsos negativos. Los falsos positivos se dan cuando la red estima que el suelo está contaminado cuando no lo está. Los falsos negativos por el contrario indican que el suelo está limpio cuando en verdad está contaminado [12]. Los datos empleados en el desarrollo de las redes neuronales se utilizaron de la siguiente manera 45 mediciones de cada muestra para el entrenamiento de las redes y como datos de validación de las redes se emplearon los coeficientes obtenidos en 180 mediciones de cada muestra. Aplicando esta metodología con la red neuronal de hidden layer simple se obtiene una tasa de falsos negativos del 4.54 % y una tasa de falsos positivos del 37.93 %, tal como se muestra en la figura 4. Por otro lado, con la red neuronal de hidden layer doble (figura 5) se obtiene una tasas de 6.67 % y 20.69 % de falsos negativos y falsos positivos correspondientemente.

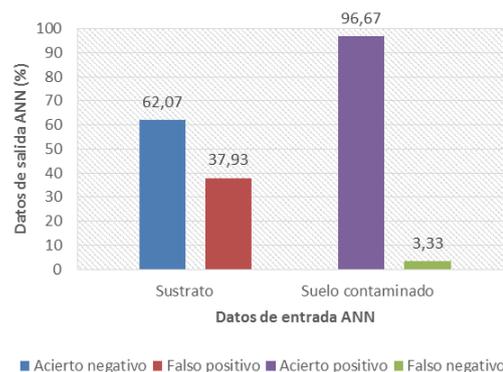


Fig. 4: Resultados obtenidos mediante la ANN con hidden layer simple.

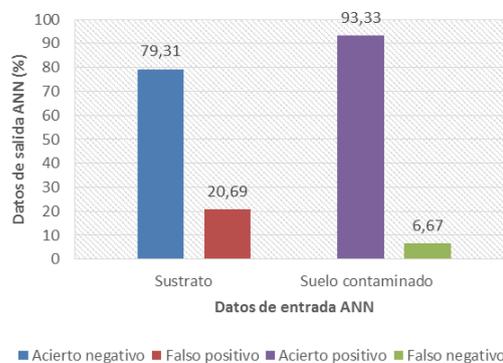


Fig. 5: Resultados obtenidos mediante la ANN con hidden layer doble.

En general, el estudio muestra mejores resultados en la identificación de muestras contaminadas frente a las muestras no contaminadas. A partir de los datos anteriores se deduce que es posible mejorar el parámetro de falsos positivos a cambio de empeorar ligeramente la correspondiente a falsos negativos.

6.- Conclusiones

El estudio se basó en la diferencia entre las propiedades térmicas del contaminante (Pb) y las del sustrato, representado como diferencias en la respuesta térmica de las muestras. Para ello se realizaron ensayos mediante el empleo de termografía de pulso largo en muestras con diferentes niveles de contaminación (muestra no contaminada, poco contaminada, parcialmente contaminada y muy contaminada), distribuidas en dos grupos con el objetivo de detectar la presencia o no de contaminantes. A partir de los datos obtenidos en los ensayos se emplearon diversas técnicas de pre-procesado seleccionando la aproximación por ajuste polinómico de grado 6 para el análisis de la respuesta térmica de las muestras. Los coeficientes obtenidos en el ajuste realizado se utilizaron como datos de entrada para el desarrollo de una red neuronal, herramienta de procesado entrenada para la detección de contaminante en las muestras.

Los mejores resultados para detectar tierra contaminada con Pb con un error del 3.33% se logran con una red neuronal con capa oculta simple (simple hidden layer ANN). Sin embargo, el resultado presenta un alto número de falsos positivos que se consiguen reducir con una red neuronal con capa oculta doble (double hidden layer ANN) Pero aumentando los falsos negativos

Agradecimientos:

Los autores agradecer al Gobierno Español por su cooperación parcial mediante el proyecto THERMO-SPC.

Referencias

- [1] D.A. GONZÁLEZ, “Contribuciones a las técnicas no destructivas para evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones

infrarrojas”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones, Universidad de Cantabria, 2006.

- [2] H.D. BENITEZ RESTREPO, C. IBARRA CASTANEDO, A. HAKIM BENDADA, X. MALDAGUE, H. LOAIZA, E. CAICEDO, “*Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales*”, Revista Tecnura 10 (20) 40–51, 2007.
- [3] [X. MALDAGUE, “Applications of infrared thermography in nondestructive evaluation”, Trends Opt. Nondestruct. Test. 591–609, 2000.
- [4] [X.P. MALDAGUE, “Introduction to NDT by active infrared thermography”, Mater. Eval. 60 (9) 1060–1073, 2002.
- [5] F.U. DOWLA, “Solving Problems in Environmental Engineering and Geosciences with Artificial Neural Networks”, MIT Press, 1995.
- [6] J. PORTA CASANELLAS, M. LÓPEZ-ACEVEDO-REGUERÍN, C. ROQUERO DE LABURU, “*Edafología: para la Agricultura y el Medio Ambiente*”, Mundi-Prensa, Madrid, 1998.
- [7] [H.S. CARSLAW, J.C. JAEGER, H. FESHBACH, “*Conduction of heat in solids*”, Phys. Today 15 74, 1962.
- [8] I.K. SENDUR, B.A. BAERTLEIN, “*Numerical simulation of thermal signatures of buried mines over a diurnal cycle*”, in: AeroSense 2000, International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [9] R.C. GONZALEZ, R.E. WOODS, S.L. EDDINS, “*Digital Image Processing using MATLAB*”, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J, 2004.
- [10] C. IBARRA-CASTANEDO, A. BENDADA, X. MALDAGUE, “*Thermographic image processing for NDT*”, in: IV Conferencia Panamericana de END, Citeseer, 2007.
- [11] J. MONTANO, “Redes neuronales artificiales aplicadas al análisis de datos”, Balearic Islands University, Spain, 2002.
- [12] P. GARCÍA ESTÉVEZ, “Aplicaciones de las Redes Neuronales en las Finanzas”, 2002.