

CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA DE UNA ZONA IMPACTADA POR MINERÍA MEDIANTE UNA RED NEURONAL DESARROLLADA CON PYTHON

VÍCTOR MANUEL EXPÓSITO SUÁREZ¹
JOSÉ FRANCISCO BENAVENTE CUEVAS²
JOSÉ ANTONIO SUÁREZ NAVARRO¹
ÁNGELA CARO BENITO¹
MARÍA BELÉN SANZ SEDANO¹
ANTONIO GONZÁLEZ SANABRIA¹
MARTA BARRAGÁN ROMERO¹
GUILLERMO HERNÁIZ ALONSO¹
HORTENSIA CHAMORRO VILLANUEVA³
MANUEL ARLANDI RODRÍGUEZ⁴
LUIS JORDÁ BORDEHORE⁵

¹Unidad de Radiactividad Ambiental y Vigilancia Radiológica (CIEMAT).

²Unidad de Dosimetría de las Radiaciones Ionizantes (CIEMAT).

³Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero.

⁴Túneles y Geomecánica S.L.

⁵E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos, UPM.

INTRODUCCIÓN

La mina *Antigua Pilar* se sitúa al noroeste de la Comunidad de Madrid, en la zona de rampa correspondiente a las es-tribaciones occidentales de la Sierra de Guadarrama, al sur del término municipal de Colmenarejo, dentro del parque regional del Curso Medio del Río Guadarrama y su Entorno. Aunque la mina fue explotada para la extracción del Cu, la presencia de torbernita (fosfato de U y Cu) presente en las mineralizaciones cúpricas de la zona entre Torrelodones y Colmenarejo, implica una elevada presencia de radionucleidos naturales [1]. El contenido de radionucleidos naturales en la zona hace que las tasas de dosis efectivas sean superiores a las del fondo natural como ocurre en otras zonas mineras impactadas por la minería del U [2]. Por otra parte, las características geológicas de la zona hacen que el uranio presente en la mina de Cu sea de origen hidrotermal. Este proceso de formación del U pudo ser debido a removiliza- ciones del U de los metasedimentos fértiles en el periodo Terciario. Al producirse el colapso de las zonas de dilatación el U habría sido expulsado hacia la superficie por los fluidos hidrotermales de carácter geotérmico que depositaron el U y los minerales acompañantes en las brechas y fracturas asociadas [3].

La caracterización radiológica de zonas impactadas por radionucleidos naturales es un proceso necesario para establecer el nivel radiológico existente en la zona de estudio y también para decidir si es necesaria la rehabilitación de las escombreras con restos de minerales [4]. En este sentido

existen numerosas investigaciones sobre la dispersión, migración y evaluación de la contaminación en zonas mineras impactadas por uranio [5-10]. Todos estos estudios coinciden en que se realizaron numerosas determinaciones con el consecuente gasto de tiempo, esfuerzo y dinero.

En la actualidad, el desarrollo de las redes neuronales y aprendizaje profundo está ayudando a predecir y ajustar el comportamiento de los radionucleidos en la naturaleza [11,12]. Por esta razón, en este trabajo los autores han desarrollado una red neuronal para realizar la caracterización radiológica de la zona impactada por la mina de Cu *Antigua Pilar*. Los objetivos parciales del estudio fueron: i) caracterizar in situ la zona de estudio realizando medidas de tasa de dosis efectiva a 1 m de altura, en contacto y en contacto con blindaje, actividad superficial alfa, beta y beta/gamma, ii) determinar los índices de actividad alfa y beta total y de las concentraciones de actividad mediante espectrometría gamma y correlación con las medidas in situ y iii) predecir y ajustar las tasas de dosis a 1 m de altura mediante una red neuronal programada en Python.

EXPERIMENTAL

Zona de estudio

La zona de estudio fue la Mina *Antigua Pilar* situada en término de Colmenarejo de la Comunidad de Madrid en las coordenadas 40,52908 N y 3,99409 O (Figuras 1 y 2). La

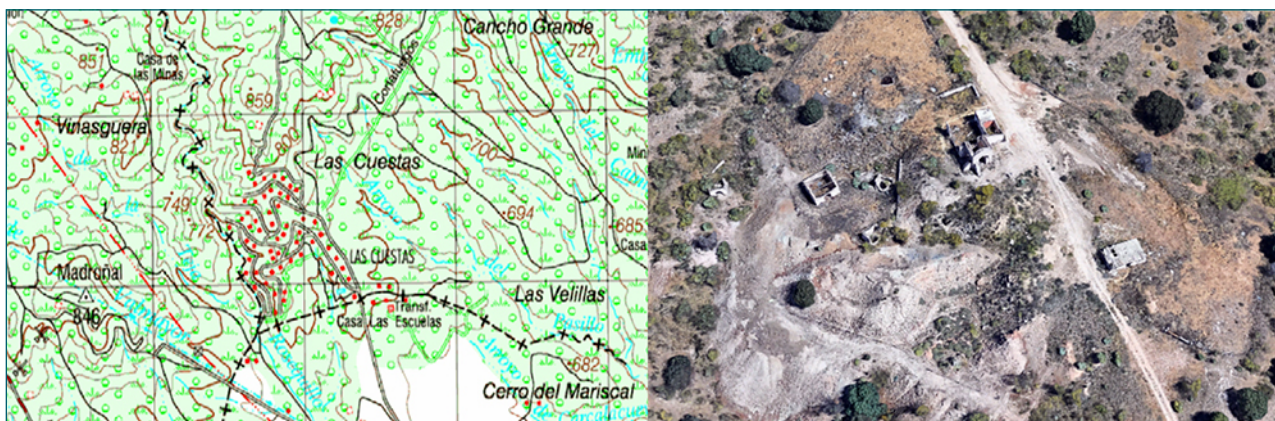


Figura 1. Mapa de cotas. Vista aérea.



Figura 2. Mina de Cobre "Antigua Pilar", Colmenarejo.



Figura 3. Afloramiento de Azurita en pozo. Estructura de la mina.

mina fue explotada de forma intermitente desde probablemente el periodo Calcolítico. Numerosos autores señalan que fue explotada por los romanos y los visigodos. En etapas más recientes, la explotación se realizó repetidamente de manera desordenada y caótica, con poca inversión, siendo abandonada en poco tiempo y pasando a manos de nuevos propietarios y finalmente paralizando las labores de explotación definitivamente en 1909 [13]. Actualmente se conservan 5 pozos, escombreras y varios edificios de finales del siglo XIX. Los pozos están anegados por el agua, a excepción de uno de ellos que comunica con galerías y pocillos interiores, pudiendo acceder hasta unos 30 m de profundidad, aunque la profundidad máxima pudo haber alcanzado los 75-100 m (Figura 3).

Los diferentes minerales presentes en la escombrera de la mina son: calcopirita, cuprita, arsenopirita, malaquita, azurita, siderita, fluorita, farmacosiderita, torbenita, metatorbenita, olivenita, crisocola, agardita y calcantita entre otros [14,15]



Figura 4. Toma de Medidas "In-situ".

La disposición de los puntos donde se realizaron las medidas in situ y toma de muestra se realizó homogéneamente teniendo en cuenta la orografía del terreno. La localización de los puntos se realizó mediante GPS. Las medidas de laboratorio se realizaron con un 10 % de las muestras en las que se realizaron las medidas in situ. Las muestras fueron tomadas utilizando un sacabocados de 10 cm de diámetro, se embolsaron y se identificaron para su posterior tratamiento en el laboratorio.

Medida in situ

Los equipos utilizados para realizar las medias in situ fueron un monitor portátil multisonda marca Lamse modelo MS6020, empleado para la medida de la contaminación superficial y la radiación mediante diferentes sondas externas intercambiables, Sonda CT115AB, para la actividad superficial alfa y beta, Sonda CT115BG, para medir la actividad superficial beta y gamma de baja energía y para la medida de la tasa de dosis efectiva $H^*(10)$ se utilizó la Sonda RD2L (Figura 4).

Las medidas realizadas fueron de dos tipos, tasas de dosis efectivas $H^*(10)$ y actividades superficiales alfa, beta y gamma. Las tasas de dosis se realizaron de tres formas a una altura de 1 m desde el suelo, en contacto y en contacto con un blindaje. El blindaje utilizado consistió en un ladrillo de plomo de 10x10 cm con 5 cm espesor y un hueco circular de 5 cm de diámetro en el centro. Las medidas de actividad superficial se realizaron para tres tipos de emisiones: alfa, beta y beta-gamma. El *spillover* del recuento beta fue corregido mediante una fuente de ^{241}Am de actividad conocida. El tiempo de recuento de todas las medidas fue de 60 segundos.

Medidas radiológicas realizadas en el laboratorio

El laboratorio de la URA y VR en el que se realizaron las determinaciones de la espectrometría gamma y los índices



Figura 5. Laboratorio de Espectrometría Gamma (CIEMAT).



Figura 6. Laboratorio de Índices de Actividad Alfa/Beta total y Centelleo Líquido (CIEMAT).

de actividad alfa y beta total está acreditado en base a la norma UNE 17025.

Espectrometría Gamma

Los detectores utilizados en este trabajo han sido 3 detectores de HPGe, en configuración vertical, tipo reverso, todos ellos caracterizados por Canberra (Figura 5). La electrónica del detector y el software de adquisición y análisis también son de la marca Canberra. La eficiencia de recuento fue calculada mediante el software LabSOCS utilizando la composición química de las muestras de suelo determinada mediante fluorescencia de rayos X y siguiendo el procedimiento descrito en [16]. Los radionucleidos determinados en este estudio fueron [17]: ^{234}Th (63,30 (2) keV), ^{226}Ra (186,211 (13) keV), ^{214}Pb (351,932 (2) keV), ^{214}Bi (609,312 (7) keV; 1120,287 (10) keV; 1764,494 (14) keV), ^{210}Pb (46,539 (1) keV, ^{212}Pb (238,632 (2) keV), ^{208}Tl (583,187 (2) keV, ^{228}Ac (911,196 (6) keV), ^{235}U (163,356 (3) keV; 205,16 (4) keV; 143,767 (3) keV), ^{227}Th (235,971 (20) keV), ^{40}K (1460,822 (6) keV) y ^{137}Cs (661,657 (3) keV). Las interferencias debidas al ^{235}U en el fotopico de 186 keV del ^{226}Ra y del ^{228}Ac en el fotopico de 1460 keV del ^{40}K fueron suprimidas mediante el algoritmo desarrollado en [18].

Índices de Actividad Alfa/Beta total

Los índices de actividad alfa y beta total se realizaron a partir de una alícuota de 50 mg de la muestra. La alícuota se depositó sobre una plancheta de acero inoxidable de 8 estrías y 5 cm de diámetro. A continuación, se adicionaron 0,5 mL de una disolución de Tween20 al 33,3 % (v/v) para fijar la alícuota de la muestra sobre la plancheta. Finalmente, la disolución de Tween20 se evaporó a sequedad bajo una lámpara de infrarrojos y el residuo obtenido se secó en una

estufa a 180°C hasta peso constante. Los recuentos alfa y beta de la muestra se realizaron en un contador proporcional de bajo fondo de flujo continuo de gas, marca Berthold modelo LB 770-2 durante 1000 minutos (Figura 6).

Estimación de la tasa de dosis efectiva a 1 m y de los índices de actividad alfa y beta total a partir de la espectrometría gamma

La tasa de dosis efectiva a 1 m y los índices de actividad alfa y beta total se estimaron a partir de las concentraciones de actividad determinadas por espectrometría gamma. La tasa de dosis efectiva a 1 m se determinó utilizando la tasa de Kerma en aire (nGy h^{-1} por Bq kg^{-1}) propuesta por Saito [19] junto con la debida al ^{137}Cs [20]:

$$E = 0,7 \cdot (0,0417 \cdot C_{40K} + 0,462 \cdot C_{226Ra} + 0,604 \cdot C_{212Pb} + 0,124 \cdot C_{137Cs}) \cdot 8760 \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

donde $C^{xx}\text{A}$ es la concentración de actividad del radionucleido ^{xx}A en Bq kg^{-1} . La expresión 1 se realizó para un 100 % de permanencia para poder compararlas con las tasas de dosis efectivas $H^*(10)$ del equipo con el que se realizaron las medidas.

En el caso de los índices de actividad alfa y beta total se utilizaron las expresiones (2) y (3) para compararlas con las concentraciones de actividad determinadas mediante espectrometría gamma. Las expresiones fueron deducidas a partir de las emisiones de los diferentes radionucleidos pertenecientes a las 3 series radiactivas naturales, al ^{137}Cs y al ^{40}K . En el caso de las series radiactivas naturales del uranio y torio se realizó la media aritmética de las concentraciones de actividad de los principales emisores gamma de cada una de ellas.

$$I_{\alpha} = 8 \cdot [\overline{C_{234Th}}, \overline{C_{226Ra}}, \overline{C_{210Pb}}] + 5,64 \cdot [\overline{C_{212Pb}}, \overline{C_{228Ac}}] + 7 \cdot [C_{235U}] \quad (2)$$

$$I_{\beta} = 6 \cdot [\overline{C_{234Th}}, \overline{C_{226Ra}}, \overline{C_{210Pb}}] + 4,36 \cdot [\overline{C_{212Pb}}, \overline{C_{228Ac}}] + 4 \cdot [C_{235U}] + [C_{40K}] + [C_{137Cs}] \quad (3)$$

Red Neuronal

La red neuronal propuesta en este estudio es compleja ya que los datos de entrada tienen una alta variabilidad y dispersión entre ellos al haberse tomado en una escombrera. Los modelos matemáticos propuestos evitan la sobredimensión de operadores. Esta sobredimensión no se resolvería con un aumento de capas y neuronas de la red neuronal sino mediante una clasificación de los datos experimentales. Por otra parte, el tratamiento de la salida de los datos necesita que los resultados se convolucionen en función de una distancia a un punto dentro de cada uno de los conjuntos clasificados.

En la Figura 7 se presenta la arquitectura de la red neuronal. El sobredimensionamiento de operadores se consigue introduciendo cada variable de entrada en diferentes redes regresoras a partir de la cuales se obtienen tantas salidas como subredes se hayan definido. Finalmente, estas salidas se transforman con un filtro convolutivo cuyo resultados es el regresor. Cada subred se diseñó con una estructura de 2 neuronas de entrada que representan las coordenadas de los puntos de muestreo. La capa oculta se diseñó con 11 neuronas y la capa de salida con una única neurona. La función de activación de cada neurona de la capa oculta se realizó con la función RELU (expresión (4)):

$$a_i = \begin{cases} \text{si } (\omega_{xi} \cdot X + \omega_{yi} \cdot Y + b_i) > 0; & (\omega_{xi} \cdot X + \omega_{yi} \cdot Y + b_i) \\ \text{si } (\omega_{xi} \cdot X + \omega_{yi} \cdot Y + b_i) \leq 0; & 0 \end{cases} \quad (4)$$

La función lineal de la capa de salida fue:

$$Y_i = \sum_{i=1}^n \omega_{iy} \times a_i + b_i \quad (5)$$

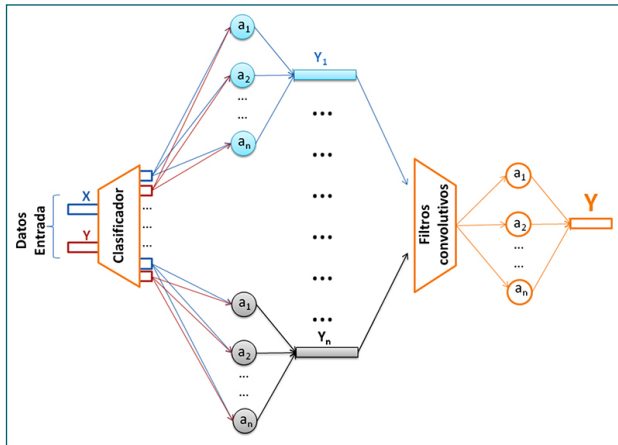


Figura 7. Arquitectura de la red neuronal.

Los datos de salida de cada subred se ponderaron en función al punto de muestreo más cercano mediante dos filtros convolutivos. El primer filtro se realizó mediante filtro de dimensión $n \times n$ (6) y el segundo con un filtro con otro filtro de dimensiones $n \times 1$ (7):

$$Y_i = \sum_{i=1}^n \omega_{iy} \times a_i + b_i \quad (6)$$

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i}\right)} \quad (7)$$

Los pesos de cada subred (ω_{ij}) se optimizaron con un proceso iterativo utilizando un algoritmo matemático basado en la reducción del gradiente:

$$t+1\omega_{ij} = t\omega_{ij} - \alpha \frac{\partial \text{Error}}{\partial \omega_{ij}} \quad (8)$$

donde α es un parámetro acelerador y t es la década de la iteración o pasos de los valores a través de la red. El error después de cada década viene definido por la siguiente expresión:

$$\text{Error} = \frac{1}{2} \cdot \left[H^*(10) - y_i(\omega_{ij}) \right]_{\text{Sub-Red}}^2 \quad (9)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación de los resultados in situ y experimentales del laboratorio

En la figura 8 se presentan las comparaciones de los recuentos alfa y beta obtenidos in situ con los índices de actividad alfa y beta obtenidos en el laboratorio. Los coeficientes de determinación obtenidos indican una tendencia satisfactoria entre los valores, asimismo se observa como la mayoría de los puntos entrarían dentro de los intervalos de confianza de los ajustes. Estos resultados indican que sería posible estimar in situ los niveles de concentración de actividad a partir de las cuentas.

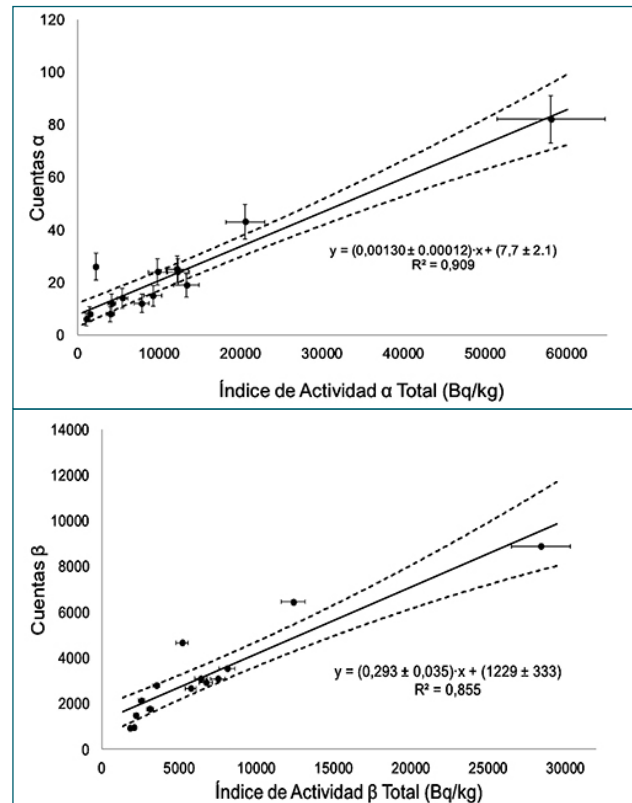


Figura 8. Comparación de los recuentos alfa y beta in-situ y los índices de actividad alfa y beta total.

Espectrometría gamma

En la Tabla 1 se presentan las concentraciones de actividad de los emisores gamma de las muestras de suelo. Las concentraciones de actividad obtenidas para los 14 puntos analizados son superiores a la media mundial [21]: 420 Bq kg⁻¹ para el 40K, 33 Bq kg⁻¹ para el ²³⁸U, 32 Bq kg⁻¹ para el ²²⁶Ra y 45 Bq kg⁻¹ para el ²³²Th. Por otra parte, los resultados reflejan que el origen del U fue de tipo hidrotermal ya que la concentración de la serie del uranio es muy superior a la del Th [22]. La serie del ²³⁸U estaba en equilibrio secular en las muestras 3, 6, 9, 13 y 14 mientras que en las restantes muestras se observaron desequilibrios que serán estudiados en profundidad en futuros trabajos.

Los resultados de concentración de actividad confirmaron que la composición del uranio correspondía al uranio natural ya que la relación del ²³⁸U/²³⁵U de 21,5 [23]. Las concentraciones de actividad del ¹³⁷Cs indicaron que la zona muestreada estaba sin alterar [24].

Comparación de los valores teóricos y experimentales

En la Figura 9 se han representado los resultados de la comparación entre los índices de actividad alfa y beta total con los deducidos a partir de los resultados de la espectrometría gamma. Al igual que se observó en el caso de las cuentas alfa y beta, se observa una tendencia entre los valores comparados.

Las tasas de dosis efectivas experimentales y deducidas teóricamente a 1 m se compararon mediante el test estadístico de la t de Student de resultados emparejados para un nivel de significación α de 0,05 [25]. El valor del parámetro

Espectrometría Gamma Radionucleidos (Bq/kg)													
Ref.	Serie del uranio						Serie del torio			Serie del actinio		⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
	²³⁴ Th	^{234m} Pa	²²⁶ Ra	²¹⁴ Pb	²¹⁴ Bi	²¹⁰ Pb	²²⁸ Ac	²¹² Pb	²⁰⁸ Tl	²³⁵ U	²²⁷ Th		
1	2279 ± 235	2515 ± 138	2162 ± 249	2000 ± 151	1805 ± 45	1458 ± 210	74.1 ± 3.3	82.6 ± 6.8	27.8 ± 1.8	92.2 ± 7.3	107 ± 12	1117 ± 49	< 3.4
2	812 ± 84	777 ± 53	609 ± 78	605 ± 46	539 ± 14	652 ± 94	60.1 ± 2.2	63.3 ± 5.1	26.4 ± 1.7	36.9 ± 3.9	37.6 ± 4.3	993 ± 43	2.89 ± 0.25
3	263 ± 27	240 ± 29	256 ± 29	213 ± 16	189.2 ± 5.4	260 ± 38	59.8 ± 2.1	65.1 ± 5.3	33.8 ± 2.1	5.3 ± 2.5	11.6 ± 1.6	971 ± 42	1.74 ± 0.16
4	1777 ± 183	1720 ± 105	1552 ± 185	1454 ± 110	1321 ± 33	1216 ± 175	73.3 ± 3.0	78.0 ± 6.4	25.8 ± 1.7	52.9 ± 6.9	82 ± 10	1036 ± 46	< 2.9
5	1157 ± 119	1168 ± 70	1076 ± 124	972 ± 74	763 ± 19	813 ± 117	58.4 ± 2.2	65.7 ± 5.3	33.5 ± 2.1	25.9 ± 3.6	51.6 ± 5.9	794 ± 34	7.78 ± 0.53
6	884 ± 91	778 ± 58	797 ± 95	841 ± 64	778 ± 22	931 ± 135	50.5 ± 3.5	56.6 ± 4.6	20.2 ± 1.4	31.9 ± 2.8	44.2 ± 5.4	564 ± 28	3.90 ± 0.46
7	2238 ± 231	2203 ± 131	2027 ± 237	1946 ± 147	1760 ± 44	1675 ± 241	78.9 ± 3.4	93.6 ± 7.7	29.7 ± 1.9	48.3 ± 8.2	115 ± 13	997 ± 45	5.90 ± 0.51
8	1467 ± 151	1592 ± 88	1464 ± 164	1083 ± 82	947 ± 24	791 ± 113	81.8 ± 2.9	87.7 ± 7.1	45.5 ± 2.8	73.9 ± 4.9	66.7 ± 7.5	797 ± 35	2.13 ± 0.25
9	6835 ± 702	6908 ± 300	6505 ± 746	7268 ± 549	6746 ± 162	6478 ± 936	97.9 ± 3.8	99.3 ± 8.1	36.3 ± 2.2	303 ± 19	404 ± 44	1261 ± 55	< 1.2
10	514 ± 53	437 ± 45	630 ± 66	659 ± 50	592 ± 15	916 ± 132	71.9 ± 2.6	78.9 ± 6.4	26.5 ± 1.7	16.5 ± 4.9	47.5 ± 5.5	889 ± 39	5.41 ± 0.39
11	1635 ± 168	1513 ± 72	3128 ± 295	3289 ± 247	2912 ± 70	3218 ± 464	68.2 ± 2.4	72.2 ± 5.9	37.5 ± 2.3	44.8 ± 4.9	163 ± 18	837 ± 36	2.02 ± 0.24
12	718 ± 75	770 ± 58	2163 ± 195	2179 ± 165	2010 ± 50	1963 ± 282	60.0 ± 3.4	67.8 ± 5.5	24.0 ± 2.0	36.0 ± 4.8	99 ± 11	984 ± 44	< 1.9
13	295 ± 31	282 ± 44	286 ± 34	251 ± 19	233.6 ± 7.0	264 ± 38	65.9 ± 2.6	72.5 ± 5.9	25.9 ± 1.7	8.4 ± 4.7	17.5 ± 2.9	1003 ± 44	14.7 ± 1.0
14	188 ± 20	193 ± 30	196 ± 22	166 ± 13	149.2 ± 4.4	157 ± 23	62.1 ± 2.2	69.4 ± 5.6	35.7 ± 2.2	8.2 ± 1.2	8.2 ± 1.3	861 ± 37	< 0.6

Las incertidumbres están expresadas para un factor de cobertura k=2.

Tabla 1. Concentraciones de actividad de los emisores gamma de las muestras de suelo.

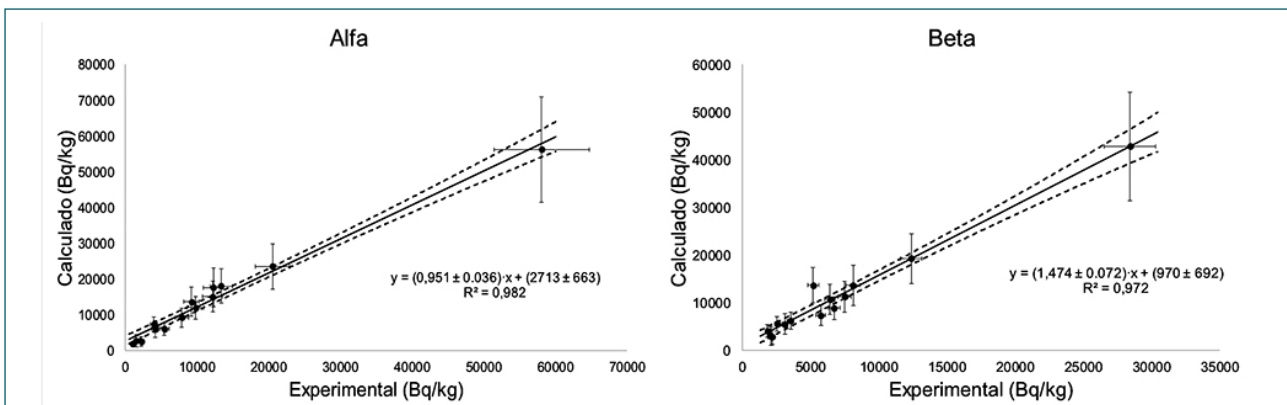


Figura 9. Comparación entre el índice de actividad alfa y beta total y los obtenidos a partir de los resultados de la espectrometría gamma.

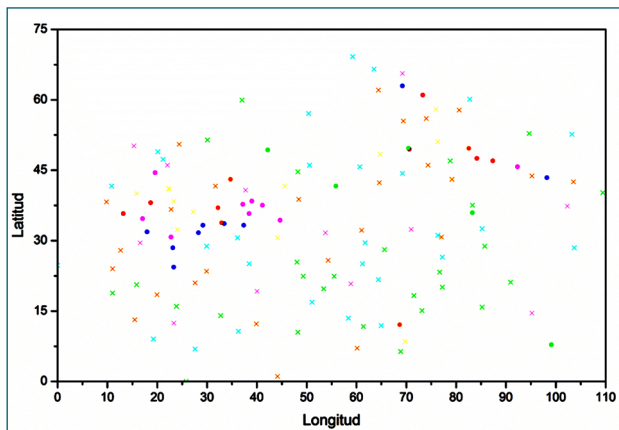


Figura 10. Datos del muestreo experimental clasificados en función de los valores de la tasa de dosis efectiva $H^*(10)$ a 1 m sobre el suelo.

p obtenido fue de 0,46 para una cola y 0,93 para 2 colas por lo que no se observó sesgo en los valores y se puede concluir que las medias de ambas tasas de dosis efectivas son comparables [26].

RESULTADOS DE LA RED NEURONAL

En la Figura 10 se presenta la clasificación realizada en los puntos de muestreo donde se realizó la medida experimental de la tasa de dosis efectiva $H^*(10)$ según lo expuesto

Y_{clase}	$H^*(10)$ nSv/h	Icono
Clase 1	+200 < 250	×
Clase 2	+250 < 300	×
Clase 3	+300 < 350	×
Clase 4	+350 < 400	×
Clase 5	+400 < 500	×
Clase 6	+500 < 600	•
Clase 7	+600 < 700	•
Clase 8	+700 < 800	•
Clase 9	Max	•
Clase 10	Min	•

Tabla 2. Conjunto de clases asociadas a las subredes.

en la sección 2.6. En la tabla 2 se presentan los rangos y notaciones de cada una de las clases representadas en la figura 5. En la Figura 11a se presenta el ejemplo del proceso de entrenamiento-control de una de las 10 subredes del total del conjunto de datos con la evolución de la función de costes. La función de costes consiste en la suma de los errores cuadráticos estimados a partir de la ecuación 9. La función de color azul se han representado los valores de entrenamiento y color naranja los test. Las funciones de costes convergieron ambas al final del proceso de entrenamiento garantizado que no se cometieron errores de sobredimensionamiento durante el ajuste. En la Figura 11b se presenta

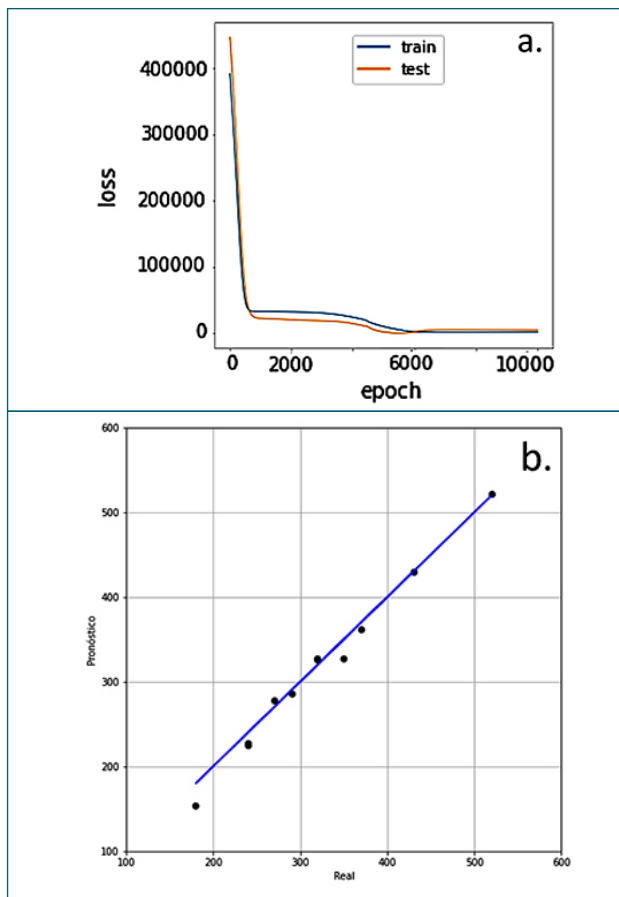


Figura 11. Valores de control de la red neuronal y valores finales pronosticados por la red neuronal.

la comparación de los valores de test pronosticados por la red neuronal convolucionada respecto a los valores experimentales (tasas de dosis efectivas $H^*(10)$ a 1 m de altura del suelo). Los valores pronosticados por la red son coherentes con los valores experimentales lo que implica que la red neuronal permite caracterizar la zona de estudio correctamente. Finalmente en la Figura 12 se presenta el resultado final de red neuronal desarrollada. Los valores obtenidos muestras como las dos zonas más impactadas están sobre el camino anexo a la mina y en la propia escombrera de la

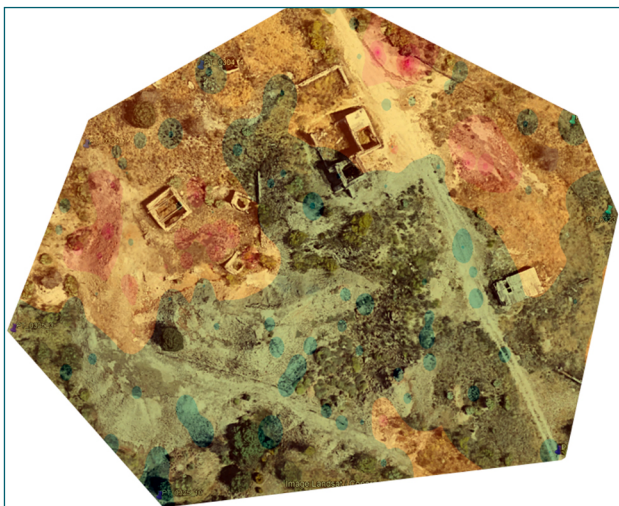


Figura 12. Resultado final de la caracterización de la zona de estudio mediante la red neuronal desarrollada.

mina. Los valores pronosticados por la red permiten acotar de una forma más realista las tasas de dosis efectivas $H^*(10)$ que otros modelos como el Kriging que distorsiona la información haciendo que aparezcan zonas contaminadas donde no corresponden [27].

CONCLUSIONES

La red neuronal desarrollada en este trabajo ha permitido caracterizar radiológicamente la escombrera y zonas anexas a la mina de Cu abandonada *Antigua Pilar*. Las tasas de dosis efectiva $H^*(10)$ predichas por la red neuronal y las obtenidas experimentalmente guardan un elevado grado de concordancia.

Por otra parte, en este estudio se ha comprobado también la equivalencia entre las medidas tomadas in situ con las determinadas en el laboratorio. Las equivalencias fueron realizadas a partir de los índices de actividad alfa y beta total y la espectrometría gamma y los parámetros correlacionados fueron las cuentas tomadas por las sondas de actividad superficial alfa y beta. Por otra parte, se comprobó como las tasas de dosis a 1 metro determinadas a partir de los coeficientes de transformación de Kerma en aire a $Bq\ kg^{-1}$ se ajustaban fielmente con las concentraciones de actividad determinadas por espectrometría gamma. En este sentido, en futuros estudios se ampliará la funcionalidad de la red neuronal para que se puedan determinar las concentraciones de actividad de los radionucleidos naturales.

En este trabajo se ha realizado un ajuste de los valores experimentales mediante la red neuronal propuesta. Aunque en la actualidad las redes neuronales han saltado a los medios dando una impresión de que son capaces de solucionar cualquier problema de forma sencilla, en este trabajo se ha demostrado la complejidad que conlleva la predicción de valores con las redes neuronales. Las redes neuronales son una herramienta que puede ser aplicada para la resolución de problemas que son muy complejos de solucionar con la estadísticas clásica, sin embargo, es importante que el científico sea el que contrala la red y no la red al científico.

AGRADECIMIENTOS

A la Comunidad de Madrid, en especial a la Consejería de Medio Ambiente, Subdirección General de Espacios Protegidos, por proporcionarnos los permisos necesarios para realizar nuestro estudio.

REFERENCIAS

- [1]. Bordehore LJ, Martínez LFM, Riart OP (2003) Minas históricas y mineralizaciones metálicas en Colmenarejo (Madrid). De re metallica (Madrid): revista de la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (1):19-25.
- [2]. Gil-Pacheco E, Suarez-Navarro JA, Sanchez-Gonzalez SM, Suarez-Navarro MJ, Hernaiz G, Garcia-Sanchez A (2020) A radiological index for evaluating the impact of an abandoned uranium mining area in Salamanca, Western Spain. Environmental Pollution 258:113825. doi:10.1016/j.envpol.2019.113825.
- [3]. Arribas A (1985) Origen, transporte y deposición del uranio en los yacimientos en pizarras de la provincia de Salamanca. Estudios geológicos 41 (5-6):301-322.
- [4]. Abdelouas A (2006) Uranium mill tailings: geochemistry, mineralogy, and environmental impact. Elements 2 (6):335-341.
- [5]. Blanco Rodríguez P, Vera Tomé F, Lozano JC (2014) Assessment of the vertical distribution of natural radionuclides in a mineralized

- uranium area in south-west Spain. *Chemosphere* 95:527-534. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.09.111>.
- [6]. Othmane G, Allard T, Morin G, Selo M, Brest J, Llorens I, Chen N, Bargar JR, Fayek M, Calas G (2013) Uranium association with iron-bearing phases in mill tailings from Gunnar, Canada. *Environ Sci Technol* 47 (22):12695-12702. doi:[10.1021/es401437y](https://doi.org/10.1021/es401437y).
 - [7]. IAEA (2004) The long term stabilization of uranium mill tailings. International Atomic Energy Agency.
 - [8]. Landa ER (2004) Uranium mill tailings: nuclear waste and natural laboratory for geochemical and radioecological investigations. *Journal of Environmental Radioactivity* 77 (1):1-27. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.01.030>.
 - [9]. Abreu MM, Magalhães MCF (2017) Assessment and Reclamation of Soils From Uranium Mining Areas: Case Studies From Portugal. In: *Assessment, Restoration and Reclamation of Mining Influenced Soils*. Elsevier, pp 203-234.
 - [10]. Momčilović M, Kovačević J, Tanić M, Đorđević M, Bačić G, Dragović S (2013) Distribution of natural radionuclides in surface soils in the vicinity of abandoned uranium mines in Serbia. *Environmental Monitoring and Assessment* 185 (2):1319-1329. doi:[10.1007/s10661-012-2634-9](https://doi.org/10.1007/s10661-012-2634-9).
 - [11]. Chham E, Pinero-García F, Brattich E, El Bardouni T, Ferro-García MA (2018) (7)Be spatial and temporal pattern in southwest of Europe (Spain): Evaluation of a predictive model. *Chemosphere* 205:194-202. doi:[10.1016/j.chemosphere.2018.04.099](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.099).
 - [12]. Cai X-M, Shan J, Le Y-L, Luo Y, Li Y-D (2021) Rapid determination of radon progeny concentration based on artificial neural networks. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 330 (3):747-753. doi:[10.1007/s10967-021-08002-5](https://doi.org/10.1007/s10967-021-08002-5).
 - [13]. Chamorro H, González-Amezúa C, Jordá L (2014) Antigua Pilar y la minería histórica en Colmenarejo. Ayuntamiento de Colmenarejo-Comunidad de Madrid, Madrid.
 - [14]. Pérez-Esteban J, Escolástico C, Sanchis I, Masaguer A, Moliner A (2019) Effects of pH Conditions and Application Rates of Commercial Humic Substances on Cu and Zn Mobility in Anthropogenic Mine Soils. *Sustainability* 11 (18):4844.
 - [15]. Jiménez R, Jordá L, Jordá R, Prado P (2004) Madrid. La minería metálica desde 1417 hasta nuestros días. *Bocamina* 14:50-89.
 - [16]. Suárez-Navarro JA, Moreno-Reyes AM, Gascó C, Alonso MM, Puertas F (2020) Gamma spectrometry and LabSOCS-calculated efficiency in the radiological characterisation of quadrangular and cubic specimens of hardened portland cement paste. *Radiation Physics and Chemistry* 171:108709. doi:[10.1016/j.radphyschem.2020.108709](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108709).
 - [17]. Be M, Chisté V, Dulieu C, Kellett M, Mougeot X, Arinc A, Chechev V, Kuzmenko N, Kibédi T, Luca A (2016) Table of radionuclides (Vol. 8-A= 41 to 198). Bureau International Des Poids et Mesures (BIPM), Sèvres.
 - [18]. Suárez-Navarro JA, Gascó C, Alonso MM, Blanco-Varela MT, Lanzon M, Puertas F (2018) Use of Genie 2000 and Excel VBA to correct for γ -ray interference in the determination of NORM building material activity concentrations. *Applied Radiation and Isotopes* 142:1-7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.09.019>.
 - [19]. Saito K, Jacob P (1995) Gamma ray fields in the air due to sources in the ground. *Radiation Protection Dosimetry* 58 (1):29-45.
 - [20]. Taskin H, Karavus M, Ay P, Topuzoglu A, Hidiroglu S, Karahan G (2009) Radionuclide concentrations in soil and lifetime cancer risk due to gamma radioactivity in Kırklareli, Turkey. *Journal of Environmental Radioactivity* 100 (1):49-53. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.10.012>.
 - [21]. UNSCEAR (2000) Sources and effects of ionizing radiation. UNSCEAR 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: Sources. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
 - [22]. Papadopoulos A, Christofides G, Koroneos A, Stoulos S, Papastefanou C (2013) Radioactive secular equilibrium in (2)(3)(8)U and (2)(3)(2)Th series in granitoids from Greece. *Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine* 75:95-104. doi:[10.1016/j.apradiso.2013.02.006](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.02.006).
 - [23]. Papachristodoulou CA, Assimakopoulos PA, Patronis NE, Ioannides KG (2003) Use of HPGe gamma-ray spectrometry to assess the isotopic composition of uranium in soils. *Journal of Environmental Radioactivity* 64:195-203.
 - [24]. Ritchie JC, McHenry JR (1990) Application of Radioactive Fallout Cesium-137 for Measuring Soil Erosion and Sediment Accumulation Rates and Patterns: A Review. *Journal of Environmental Quality* 19 (2):215-233. doi:[10.2134/jeq1990.00472425001900020006x](https://doi.org/10.2134/jeq1990.00472425001900020006x).
 - [25]. Ramos GR, García-Alvarez-Coque C (2001) Quimiometría. Síntesis.
 - [26]. Leenen I (2012) La prueba de la hipótesis nula y sus alternativas: revisión de algunas críticas y su relevancia para las ciencias médicas. *Investigación en educación médica* 1 (4):225-234.
 - [27]. Suárez VME, Cuevas JFB, Navarro JAS, Benito ÁC, Chham E, Sedano MBS, Sanabria AG, Romero MB, Alonso GH, Villanueva HC, Rodríguez MA, Bordehore LJ (2021) Aplicación de una red neuronal para la caracterización radiológica de una zona impactada por minería. Paper presented at the 46 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, Granada. ■