

Estudio de la transferencia de radón agua-aire en condiciones controladas

A. Noverques, B. Juste, M. Sancho, G. Verdú
Instituto de Seguridad Industrial y Medio Ambiente (ISIRYM).
Universitat Politècnica de València. Camí de Vera s/n 46022 València. (+34) 963877000

Resumen – El radón, gas radiactivo que proviene del uranio y la desintegración del radio, fue considerado como un elemento cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud en 2010. De entre las diversas fuentes de radón, en esta investigación se ha seleccionado el agua como fuente principal. Se ha estudiado la influencia de la concentración del radón en agua en los niveles de radón en el aire tanto a escala de laboratorio como en una instalación real. Para este propósito, se ha diseñado un dispositivo experimental que permite analizar esta influencia en condiciones estables de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica, reduciendo así la interferencia de estas variables en las mediciones de radón. Para las mediciones a escala real, se han analizado los niveles de radón en el agua y su posible influencia en el aumento de la concentración de aire en una planta de pre-tratamiento de aguas residuales.

1. INTRODUCCIÓN.

El radón es un gas radioactivo producido a partir de la desintegración del uranio y el radio. De entre sus tres isótopos naturales (^{220}Rn , ^{221}Rn y ^{222}Rn) el que presenta un mayor periodo de desintegración (3,8 días) y, por tanto, mayor significación radiológica es el ^{222}Rn . Este gas noble, inerte, viaja a través del espacio intersticial del suelo hasta su exhalación a la superficie terrestre. Puede diluirse con los gases de la atmósfera o penetrar, en caso de ubicarse un edificio, en su interior, llegando a alcanzar concentraciones elevadas en espacios cerrados. La peligrosidad de este gas reside en dos de sus descendientes, ^{218}Po y ^{214}Po , ambos emisores alfa, que se adhieren a los aerosoles y partículas presentes en el aire. Durante el proceso de inhalación, estos se depositan sobre el tejido pulmonar causando daño celular. La Organización Mundial de la Salud (OMS) clasificó al radón como elemento cancerígeno (OMS, 2009) y se considera primera causa de cáncer de pulmón en personas no fumadoras y segunda, tras el tabaquismo, en personas fumadoras.

Debido a la preocupación social y a los avances en el campo de la protección radiológica, en 2013 el Diario Oficial de la Unión Europea publicó la Directiva 2013/50/EURATOM. Se establecían valores límite para la concentración de radón en espacios públicos, lugares de trabajo y viviendas, así como planes de acción frente a este gas con el objetivo de reducir sus niveles y mitigar los efectos nocivos para la salud humana.

Pese que el radón se produce de forma natural, existen diferentes fuentes a tener en cuenta para su adecuado control: *suelo*, en función del tipo de roca y de su contenido en uranio y radio; *agua*, cuando el radón presente en sedimentos se disuelve en aguas subterráneas, acuíferos, ríos, etc, y *materiales de construcción* dado que algunas materias primas también contienen uranio y/o radio. A nivel nacional se dispone de un mapa predictivo de los niveles de radón en aire (García.Talavera et al, 2013). Sin embargo, existen menos referencias de las concentraciones de actividad de radón en agua. Algunas de estas investigaciones se refieren a los niveles en aguas subterráneas (Moreno et al., 2014; Alonso et al, 2015; Baudron et al., 2015), los niveles de radón en *spas* (Soto et al., 1995; Ródenas et al., 2008) o estudio de los procesos de recarga-descarga en acuíferos (Celaya, S., 2018) entre otros.

En cuanto a los niveles de control de radón en agua potable, y de acuerdo a la Directiva 2013/51/EURATOM se establecen unos valores de concentración de entre $100 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ and $1000 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$. En España, la legislación vigente (*Real Decreto 314/2016*) fija el valor paramétrico de $500 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$. Se ha de tener en cuenta que la exposición al radón considerando el agua como fuente principal, es debida a dos procesos diferenciados. Por un lado, la ingesta directa de esta agua potable que podría afectar al sistema digestivo y, por otro lado, la inhalación de gas radón durante

procesos en los que se agita el agua (lavado platos, duchas, riegos, etc). Se considera que el riesgo de sufrir cáncer de pulmón es mayor durante la inhalación que en la propia ingesta de agua (Zeeb et al., 2015). Por tanto, es importante analizar los fenómenos de transferencia de radón del agua al aire, no solo durante el consumo doméstico en viviendas, sino también en industrias como la cerámica o plantas de tratamiento y depuradoras, que agitan elevadas cantidades de agua.

Es por esto que esta investigación base, previa al control de la transferencia entre ambos medios, se centra en el estudio de la influencia del radón presente en agua sobre los niveles de radón en aire, tanto a escala de laboratorio como a escala real. Para ello, se ha diseñado un equipo experimental que permite realizar diversas mediciones en condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica. A escala real, se ha seleccionado una Planta de Pre-Tratamiento de Aguas Residuales.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1. Equipos utilizados para la medida de radón en agua.

En este apartado se realiza una breve descripción de los detectores utilizados tanto para los niveles de concentración de radón en agua como para radón en aire.

2.1.1. Detectores de radón en agua.

RAD7-H20: monitor en continuo que mediante el burbujeo de una muestra de agua de 40 mL analiza la concentración que se transfiere de este medio al aire.

Electretes, sistema E-PERM: consiste en un electrete, disco de Teflón cargado positivamente, conectado a una cámara de difusión de radón, suspendida en el interior de una jarra impermeable al radón en cuyo interior se ha depositado un vial de 67 mL con agua a analizar. A través de la descarga del electrete se conoce la concentración de radón en la muestra.

Detector de centelleo Hidex 600SL: mediante el método de extracción a partir de la mezcla de 8 mL de muestra de agua y 12 mL de cocktail, este equipo permite detectar la radiación ionizante basándose en la propiedad de luminiscencia de la mezcla.

2.1.2. Detectores de radón en aire.

RadonScout Plus: se trata de un monitor en continuo, con un detector de alto voltaje en su interior. La concentración de radón en aire se obtiene a través de los descendientes de vida corta del radón que se producen en su decaimiento en el interior de la cámara.

Corentium Pro: a través de la difusión del radón en su interior y según espectrometría alfa, este detector ofrece los niveles de radón.

Electretes, sistema E-PERM para radón en aire: electrete conectado a una cámara expuesta en el interior de una caja con orificios a través de los cuales puede circular el aire. Las medidas se realizan siempre por duplicado.

2.2. Estudio de la influencia del radón en agua en los niveles de radón en aire a escala laboratorio.

2.2.1. Diseño del equipo experimental.

Se desarrolla un equipo experimental que permita la medición simultánea de la concentración de radón en agua y en aire en unas condiciones ambientales controladas analizando así la posible relación entre las concentraciones en ambos medios. Se trata de tanque de polietileno de alta densidad de 120 L, impermeable al radón y sellado herméticamente. En el fondo del tanque se introduce una piedra pechblenda con una actividad de $45.09 \text{ kBq}\cdot\text{Kg}^{-1}$, la fuente de radón. Asimismo, se posiciona un soporte metálico en el interior del tanque, justo por encima de la fuente donde se ubicarán los detectores de radón en aire (ver Figura 1).

El equipo experimental, mostrado en la Figura 1, ha permitido llevar a cabo dos procesos: la caracterización de la fuente de radón que permite establecer parámetros como su tasa de emisión, así como el propio estudio de la influencia del radón en agua en los niveles de radón en aire.

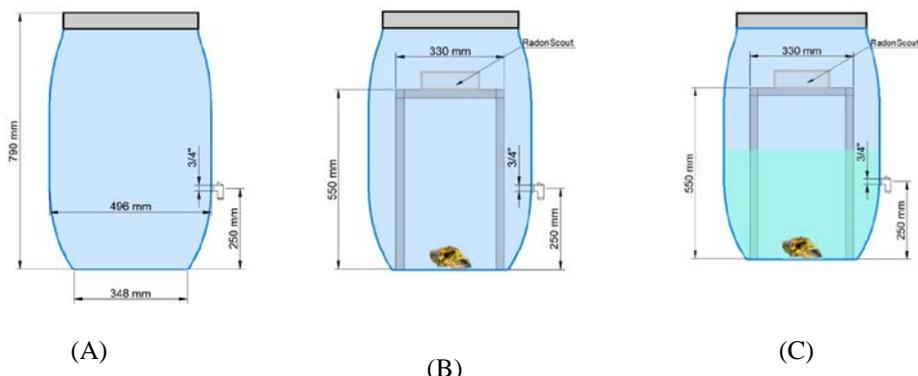


Figura 1. Diagrama del equipo experimental: (A) dimensiones del tanque; (B) disposición de los elementos para la caracterización de la fuente; (C) disposición de los elementos para las mediciones de la influencia del radón en agua en los niveles de radón en aire

2.2.2. Modelo teórico para la evolución de la concentración de radón.

En esta sección se detalla el modelo matemático (Modelo de Compartimento Cerrado, MCC) que se aplica para la caracterización de la fuente y la predicción de la concentración de radón en aire que emite en función del periodo de exposición. El MCC se utiliza para analizar la evolución de la concentración de radón en el interior del tanque cuando no existe aporte externo de agua, está en reposo y mantiene su volumen constante (Kowalczyk, 2010; Sainz et al., 2016). La ecuación diferencial que determina estas condiciones de operación se muestran en la ecuación 1.

(1)

Donde C_{Rn} es la concentración de radón en agua ($Bq \cdot L^{-1}$), ϕ es la tasa de emisión de radón ($Bq \cdot L^{-1} \cdot hr^{-1}$) y λ es la constante de desintegración (hr^{-1}) que incluye dos contribuciones de la ecuación (2): λ_{Rn} , constante de desintegración del radón (hr^{-1}) y λ_p , constante de pérdidas del radón en la interfase agua-aire.

(2)

Resolviendo la ecuación diferencial (1), se obtiene la evolución de la concentración de radón según la expresión de la ecuación (3):

$$C_{Rn}(t) = C_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) + \frac{\phi}{\lambda} \cdot (1 - \exp(-\lambda \cdot t)) \quad (3)$$

Donde C_0 es la concentración de radón para un tiempo inicial $t=0s$ ($Bq \cdot m^{-3}$) y t es el tiempo de exposición (hr).

Si se aplica la condición matemática de máximo, se obtiene la concentración máxima (Ecuación 4) de radón que se alcanzaría durante todo el periodo de exposición en equilibrio.

(4)

A partir del ajuste de los valores obtenidos en las mediciones con el modelo MCC se obtiene la concentración máxima de radón que podría alcanzar la fuente, así como su tasa de emisión.

2.2.3. Caracterización de la fuente de radón.

Para caracterizar la fuente de radón, la piedra pechblenda se deposita en el fondo del tanque (ver Figura 1 (B)). La acumulación de radón en aire en el interior se analiza durante 48 horas mediante el detector RadonScout Plus, instalado sobre el soporte metálico. Durante el período de exposición, el tanque está sellado herméticamente para mantener constantes las variables temperatura, presión, y humedad relativa. Los resultados de esta prueba se ajustan según el modelo de modelo de compartimento cerrado descrito anteriormente en el punto 2.2.2.

2.2.4. Estudio de la influencia del radón presente en el agua en los niveles de radón en aire.

El tanque experimental de 120L de capacidad se llena con 50 L de agua potable libre de radón libre mientras el volumen restante permanece únicamente con aire. La piedra pechblenda se mantiene en el fondo del depósito y los detectores RadonScout Plus y Corentium Pro se ubican sobre el soporte metálico (Figura 1 (C)). Al rellenar el depósito con agua, la fuente de radón permite su enriquecimiento de forma gradual en función del tiempo que permanece la pechblenda sumergida. Cuando el agua ya está enriquecida, el ^{222}Rn se transfiere al aire retenido en el interior del tanque donde tiende a acumularse debido al sellado hermético del mismo. Las concentraciones de radón en agua y aire se miden simultáneamente mediante los detectores Hidex 600SL y RadonScout Plus y Corentium Pro, respectivamente.

Se estudia de forma experimental la evolución de la concentración de radón en el depósito tanto para la fase acuosa como para el aire. Asimismo, el modelo teórico MCC se emplea para analizar el balance de masa de radón en el sistema de acuerdo con la ecuación (5):

(5)

Donde $C_{\text{Rn}}(t)$ es la concentración teórica de radón en agua ($\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$) durante un instante t aplicando el modelo MCC, $C_{\text{W,t}}$ y $C_{\text{a,t}}$ son las concentraciones de radón en agua y en aire respectivamente en el depósito en un mismo instante t .

Analizando también la distribución de radón en las dos fases se aplica el coeficiente de Ostwald, parámetro que depende de la temperatura del sistema (González, 2018):

(6)

2.3. Estudio de la influencia de los niveles de radón en aire en una instalación real

Con el objetivo de realizar mediciones de radón en agua y aire en una situación real, se han analizado sus concentraciones en una Planta de Pre-Tratamiento de Aguas Residuales (PPTAR). Su dimensión es de aproximadamente 800 m^3 con un flujo de entrada de agua de $12000 \text{ m}^3\cdot\text{día}^{-1}$. El agua de alimentación de la planta presenta valores significativos de radón por lo que este podría acumularse en su interior. Las mediciones de radón en agua y aire dentro de la planta se han realizado utilizando el sistema de detección RAD7-H2O y los electretes E-PERM respectivamente. Para los niveles de radón en aire los detectores se han expuesto por duplicado durante 3 meses.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización de la fuente de radón

Para caracterizar la piedra pechblenda y ajustar los valores obtenidos al modelo MCC de la (3), se analiza la concentración de radón en el aire dentro del tanque en ausencia de agua. Los valores experimentales registrados de la concentración de radón en el aire se muestran en la Figura 2, donde se observa que los valores de temperatura, humedad relativa (HR) y presión permanecen constantes durante el período de exposición. La temperatura ambiente promedio se establece en 22°C ; la humedad relativa en un 88% y la presión a 1018 mbar, aproximadamente. Mediante el Test ANOVA se analiza la posible dependencia de la concentración de radón en el aire con estas tres variables.

Los resultados muestran que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la concentración de radón y las variables atmosféricas. A partir de los datos obtenidos se observa que la concentración de radón en el aire que se acumula en el interior del tanque sellado herméticamente oscila entre 0 y $9.28 \cdot 10^5$ Bq·m⁻³. El ajuste de los resultados experimentales a la ecuación exponencial del modelo MCC (1) se muestra en la Figura 2.

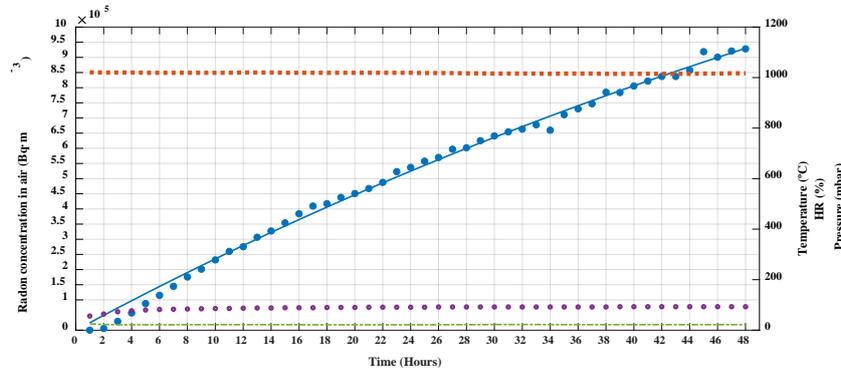


Figura 2. Concentración de radón en aire durante la caracterización de la piedra pechblenda

Los resultados obtenidos se han ajustado a la ecuación exponencial (3) con un R-square de 0.99. De esta forma se pueden calcular los diferentes parámetros del modelo, que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros obtenidos del ajuste del MCC

C_0 (Bq·m ⁻³)	0
ϕ (Bq·m ⁻³ ·hr)	24820 ± 910
λ (hr ⁻¹)	0.01082 ± 0.00215
C_{MAX} (kBq·m ⁻³)	2293.90

Estos resultados permiten conocer los valores de la concentración máxima de radón en el aire, así como la teórica durante un cierto período de tiempo, sin agua dentro del tanque.

3.2. Estudio de la influencia del radón en el agua sobre el radón en el aire a escala de laboratorio.

Una vez finalizada la caracterización de la fuente de radón, se realizan los ensayos experimentales con agua en el interior del tanque y se miden las concentraciones de radón en agua y aire. Los resultados de radón en agua, calculados como el promedio de cinco muestras medidas durante 14 días por el detector Hidex 600 SL, se muestran en la Figura 3.

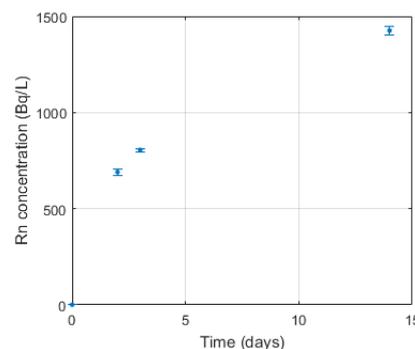


Figura 3. Concentración de radón en agua en el equipo experimental

Como se observa, en solo dos días, la concentración de radón en agua aumenta rápidamente y con valores que oscilan entre 690 ± 18 y 1426 ± 26 Bq·L⁻¹. El enriquecimiento de agua con radón se ha producido de forma satisfactoria.

En vista de los resultados obtenidos, y siguiendo líneas de investigación futuras, se está analizando un nuevo un modelo matemático, similar al MCC que aplique al estudio de la evolución temporal de la concentración de radón en agua. Esto requerirá una mayor cantidad de muestras tanto en intervalos menores (de una hora aproximadamente) así como durante periodos de exposición mayores a los 14 días.

Una vez estudiada la concentración de radón en agua se estudia la del aire, medida en el interior del tanque mediante los detectores RadonScout Plus y CorentiumPro. Los resultados se muestran en la Figura 4.

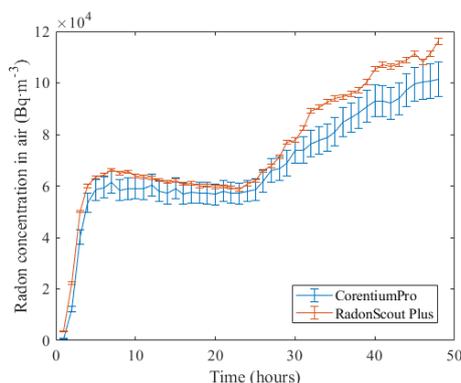


Figura 4. Concentración de radón en aire debida a la transferencia del agua

Tal y como se observa en la Figura 4, se produce un aumento de la concentración de radón en el aire durante el período todo el periodo de exposición. Inicialmente, durante 5 horas, ésta aumenta para posteriormente, y durante 20 horas, permanecer constante. Finalmente, y hasta las 48 horas de exposición se alcanzan los $11.62 \cdot 10^4 \pm 11.6$ Bq·m⁻³ (medido mediante RadonScout) y 10.13 ± 6.7 ($\cdot 10^4$) Bq·m⁻³ (CorentiumPro).

La tendencia de la evolución según los resultados obtenidos muestra cierto estancamiento de la concentración de radón en aire durante un corto período de tiempo. Esto se debe principalmente al lento proceso de difusión del agua al aire ya que esta actúa como barrera y ralentiza el proceso de transferencia, justificando así la importancia de considerar el proceso de transferencia del agua al aire. Inicialmente, la piedra pecblendada emite radón al agua desde donde se producen dos fenómenos: burbujeo y difusión. Juntos, estos dos procesos determinan cómo es la transferencia de aire. De igual modo, se observa que los valores medidos con ambos detectores ofrecen una misma tendencia, lo que confirma la repetibilidad de los resultados y el comportamiento del agua cuando no se produce agitación.

Para verificar el balance de masa de radón en el tanque experimental, la ecuación (5) se aplica a t=48 horas, dando como resultado los valores de la Tabla 2:

Tabla 2. Concentración de radón en agua y aire en el equipo experimental

$C_{Rn(t)}$ (Bq·m ⁻³)	$C_{w,t}$ (Bq·m ⁻³)	$C_{a,t}$ (Bq·m ⁻³)	$C_{w,t} + C_{a,t}$ (Bq·m ⁻³)
$9 \cdot 10^5$	$6.9 \cdot 10^5$	$1.162 \cdot 10^5$	$8.062 \cdot 10^5$

La concentración de radón obtenida de forma experimental a las 48 horas mediante el uso del tanque (suma de $C_{w,t}$ y $C_{a,t}$) es mucho menor que el valor teórico esperado ($C_{Rn(t)}$). Esto se debe a las diferencias en los valores del coeficiente de difusión del radón en aire (gas) y en agua (líquido). El valor del coeficiente de un soluto (en este caso ²²²Rn) en un gas, es de 10^{-4} m²·s⁻¹, mientras que este varía en un líquido entre 10^{-9} y 10^{-10} m²·s⁻¹ (Treybal, 1980).

Por lo tanto, la difusión de un soluto en un líquido es mucho menor que en un gas dado que las partículas están muy cerca unas de otras en comparación con las del gas. Las moléculas del soluto, el radón, que se difunde, colisionarán con las del líquido (agua) con mayor frecuencia y se difundirá más lentamente que en gases (aire). Se evidencia que la concentración de radón en el tanque en ausencia de agua es mucho mayor que cuando se agrega el líquido.

Tras el análisis de la distribución de radón entre las dos fases dentro del tanque, se analiza su solubilidad a partir del coeficiente de Ostwald. Considerando una $T=20^{\circ}\text{C}$ y la ecuación (6) se obtiene un valor de 0.256 para K_{Ostwald} . Este valor de solubilidad indica que solo el 25,6% del radón se disuelve en agua, mientras que el 74,4% permanece insoluble como un gas.

3.3. Análisis de la concentración de radón en agua y aire en la Plante de Pre-Tratamiento

Los valores promedio de concentración de radón en agua y aire medidos para dos años consecutivos se muestran en la Tabla 3. Por razones técnicas, las mediciones realizadas en agua fueron realizadas por el RAD7 y las mediciones de aire fueron tomadas por el sistema de electretes E-PERM.

Periodo exposición	Concentración radón en agua ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$) RAD7	Temperatura agua ($^{\circ}\text{C}$)	Concentración de radón en aire ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$) E-PERM	Condiciones atmosféricas
Test 1: Marzo-Junio	41.5 ± 2.8	15~23	0.677 ± 0.34	$T= 20\sim 22^{\circ}\text{C}$ HR: 55~77% P =1018 mbar
Test 2: Febrero a Abril	34 ± 2.2	13~16	0.634 ± 0.43	$T= 13\sim 14^{\circ}\text{C}$ HR: 55~77% P =1018 mbar

Según los resultados que se muestran en la Tabla 3, los valores de radón en agua oscilan no exceden los límites legislativos para el consumo de agua potable, (entre $500\text{-}1000 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ según Real Decreto 314 / 2016). Sin embargo, la concentración de radón en el aire supera el límite de exposición en cada medida, fijado en $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ (Directiva 2013/59/EURATOM). Se observa que niveles de concentración de ^{222}Rn en agua por debajo del límite legal generan valores de concentración en aire superiores a los límites cuando esta se encuentre en continua agitación.

3.4. Comparación entre los resultados obtenidos a escala laboratorio y a escala real.

El objetivo de esta sección es comparar los resultados de las concentraciones medidas en agua y aire tanto a escala laboratorio como en la instalación real. La Tabla 4 muestra los valores medidos, así como el coeficiente de proporcionalidad entre los valores de agua y aire.

Localización medida	Concentración de radon en agua ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	Concentración de radon en aire ($\text{kBq}\cdot\text{m}^{-3}$)	Coeficiente de proporcionalidad
Equipo experimental	690 ± 0.18	116.2 ± 11.6	5.94
PPTAR-Test 1	41.5 ± 2.8	0.677 ± 0.34	61.29
PPTAR- Test 2	34 ± 2.2	0.634 ± 0.43	53.50

El coeficiente de proporcionalidad entre la concentración de radón en agua y en aire para el equipo experimental es aproximadamente 10 veces menor que el obtenido en el caso de la instalación real, a pesar de mostrar una concentración de radón en agua significativamente más

elevada. Esto puede deberse a la diferencia del estado del agua en ambos sistemas: en el tanque del laboratorio el agua permanece estanca, sin agitación mientras que en la planta está en continuo movimiento a través de los distintos filtros y tamices. De esta forma, se determina que la transferencia de radón a través del agua aumenta por la turbulencia producida cuando se encuentra en agitación.

4. CONCLUSIONES.

El objetivo principal de esta investigación, estudiar la influencia del radón en el agua sobre los niveles de radón en el aire a escala de laboratorio y en una instalación real se ha logrado satisfactoriamente. Para desarrollar las mediciones a escala de laboratorio se ha diseñado un equipo experimental que permite enriquecer el agua con radón, así como estudiar la influencia de la concentración de radón en el agua sobre los niveles de radón en el aire en condiciones estables de temperatura, humedad o presión relativa. Se demuestra así la estabilidad y repetibilidad de los resultados obtenidos.

Mediante este dispositivo se ha caracterizado una piedra pechblenda como fuente de radón. Se ha obtenido su tasa de emisión ($\phi = 24820 \pm 910$ (Bq·m⁻³·hr)), así como la concentración máxima en el aire que podría alcanzar en el sistema diseñado ($C_{max} = 2293.90$ kBq·m⁻³). Los resultados se han ajustado al Modelo de Compartimiento Cerrado (MCC) con un R-Square de 0.99. Asimismo, el diseño del depósito ha permitido enriquecer con radón una cierta cantidad de agua de forma satisfactoria, alcanzando una concentración de radón de 1426 ± 26 Bq·L⁻¹ en 14 días, medido por Hidex 600SL. Por lo tanto, el sistema experimental ha demostrado ser muy útil para obtener agua con radón en el laboratorio. Además, en futuras investigaciones se estudiará un modelo matemático que permita predecir la concentración de radón en el agua como se ha hecho para el aire.

Asimismo, se ha analizado la concentración de radón en aire en el interior del depósito mediante los detectores RadonScout Plus y Corentium Pro cuando el agua ya estaba enriquecida. Los resultados muestran un aumento inicial del nivel de radón en aire, su posterior estabilización durante 20 horas y de nuevo, un aumento hasta alcanzar una concentración de $1.162 \cdot 10^5$ Bq·m⁻³. La tendencia de la curva de resultados de radón en el aire muestra cierto estancamiento durante un corto período de tiempo, principalmente debido al proceso de burbujeo y difusión del radón. Este proceso de difusión del radón del agua al aire es lento dado que el ²²²Rn permanece insoluble, como gas, en el agua (según la constante de Ostwald).

Analizando la concentración de radón experimental medida y la teórica calculada, se observa cierta disparidad en los resultados debido a la diferencia en la velocidad de difusión del radón dependiendo si lo hace a través del líquido (agua) o del gas (aire). Comparando los niveles medidos con los detectores RadonScout Plus y CorentiumPro, se concluye ambos presentan la misma línea de tendencia lo que confirma la repetibilidad de resultados a través del dispositivo experimental.

Además, se ha estudiado la concentración de radón en agua y aire en una Planta de Pre-Tratamiento de Aguas Residuales. Los valores en el agua están por debajo del límite legislativo para el consumo humano, mientras que para el radón en el aire se exceden los límites legales en todas las mediciones realizadas. Esto puede deberse al efecto de la turbulencia en el agua creada por el movimiento de los diferentes procesos de tratamiento en el interior de la planta.

Analizando el coeficiente de proporcionalidad entre la concentración de radón en el agua y en el aire a escala de laboratorio y en una instalación real se observa que la diferencia entre los coeficientes es 10 veces menor para el dispositivo experimental. Se ratifica así la importancia del proceso de aireación y burbujeo que experimenta el agua en la planta de pre-tratamiento. Esta es la razón por la cual, como investigación futura, se mejorará el equipo experimental para lograr el burbujeo en el interior para analizar este proceso de transferencia cuando el sistema no es estable.

De todos los resultados obtenidos tanto a través de equipos experimentales como de mediciones de a escala real, se observa una clara influencia de la concentración de radón en el agua en el aire para una ubicación cerrada. Se requieren estudios futuros para definir la transferencia de radón del agua al aire, tanto a escala real como de laboratorio.

AGRADECIMIENTOS.

Los autores quieren agradecer su colaboración al Departamento de Ingeniería Química y Nuclear y al Laboratorio de Radiactividad Ambiental, así como a la Cátedra Vicente Serradell de la Universitat Politècnica de València.

REFERENCIAS. ARIAL 14. ESPACIADO ENTRE PÁRRAFOS 6 PUNTOS

Alonso Hernández, H., Cruz-Fuentes, T., Rodríguez-Gonzalez, A., González Guerra, J., Arnedo Ayensa, M. Á., Martel Escobar, P., & Tejera-Cruz, A. (2015). Contenido de radón en aguas subterráneas del noreste de Gran Canaria.

Baudron, P., Cockenpot, S., Lopez-Castejon, F., Radakovitch, O., Gilabert, J., Mayer, A., ... & Claude, C. (2015). Combining radon, short-lived radium isotopes and hydrodynamic modeling to assess submarine groundwater discharge from an anthropized semiarid watershed to a Mediterranean lagoon (Mar Menor, SE Spain). *Journal of Hydrology*, 525, 55-71.

Battino, R. (1984). The Ostwald coefficient of gas solubility. *Fluid phase equilibria*, 15(3), 231-240.

Cherta Val, A., Baixeras Divar, C., & García i Orellana, J. (2008). Nivells de radó en exterior i recintes tancats a la marjal càrstica de Peníscola.

García-Talavera San Miguel, M., Martín Matarranz, J. L., Gil de Mingo, R., García Cadierno, J. P., & Suárez Mahou, E. (2013). El mapa predictivo de exposición al radón en España. CSN.

Gonzalez, S. C. (2018). Estudio del comportamiento del ²²²Rn en los procesos de recarga-descarga en acuíferos: simulación en laboratorio y aplicación a un caso real (Universidad de Cantabria).

Kowalczyk, A. J., & Froelich, P. N. (2010). Cave air ventilation and CO₂ outgassing by radon-222 modeling: how fast do caves breathe. *Earth and Planetary Science Letters*, 289(1-2), 209-219.

Soto, J., Fernandez, P. L., Quindós, L. S., & Gomez-Arozamena, J. (1995). Radioactivity in Spanish spas. *Science of the total environment*, 162(2-3), 187-192.

Matos, L. E. (1997). Riesgo de cáncer en exposiciones ocupacionales. *Gerencia Ambiental*, 5(33), 36.

Manual, RAD7. Radon Detector User Manual (2000). DurrIDGE Co.

Moreno, V., Bach, J., Baixeras, C., & Font, L. (2014). Radon levels in groundwaters and natural radioactivity in soils of the volcanic region of La Garrotxa, Spain. *Journal of environmental radioactivity*, 128, 1-8.

Moreno, V., Cherta, A., Rodellas, V., García-Solsona, E., García-Orellana, J., & Baixeras, C. (2009). Resultados preliminares de los niveles de Radón en la marjal de Peñíscola. *Radioprotección* num, 60, 17.

Noverques Medina, Aina (2017). Trabajo Final de Máster. *Desarrollo de metodologías para la realización de mediciones de exhalación de Radón 222*. Universitat Politècnica de València.

Real Decreto 314/2016, de 29 de julio, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 30 de julio de 2016, núm. 183, pp 53106

Rodellas i Vila, V. (2008). Distribució de radionúclids naturals en una marjal càrstica del Mediterrani occidental: la marjal de Peníscola.

Ródenas, C., Gómez, J., Soto, J., & Maraver, F. (2008). Natural radioactivity of spring water used as spas in Spain. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 277(3), 625-630.

WHO. Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective (2009)

Sainz, C., Rábago, D., Fuente, I., Celaya, S., & Quindós, L. S. (2016). Description of the behavior of an aquifer by using continuous radon monitoring in a thermal spa. *Science of The Total Environment*, 543, 460-466.

Treybal, R. E. (1980). Mass transfer operations. New York, 466.

User Manual Radon Scout Plus, (Sarad Company)

Zeeb, h., & Shannoun, f. (2015). Manual de la OMS sobre el radón en interiores: una perspectiva de salud pública.