

**TRABAJO DE FIN DE MÁSTER**

**CRIBADO RADIOLÓGICO DEL AGUA DE  
CONSUMO EN LA ISLA DE TENERIFE**

**Esperanza Hernández Rodríguez**

**Máster en Seguridad y Calidad de los Alimentos (2023-2024)**

Tutoras

**María del Carmen Rubio Armendáriz**

Área de Toxicología

**María López Pérez**

Área de Medicina Física

Julio 2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero comenzar agradeciendo profundamente a todas las personas con las que coincidí en FIMERALL durante los meses de realización de este trabajo: Xiomara, Pili, Eduardo y Radek. Muchas gracias por todo, así como por tantos buenos ratos. También al SEGAI, por permitirme realizar los ensayos correspondientes, a coste cero.

A mis tutoras María y Carmen, quiero dar las gracias por la ayuda, asesoramiento y orientación técnica y académica.

Por último, quiero dedicar este trabajo a Sandra y a Patricia, compañeras de mi querida Gran Canaria, dos grandes profesionales, por todas las veces que me han regalado su experiencia y conocimientos, así como por los ánimos incondicionales en estos tiempos no tan buenos. Mil gracias a las dos.

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	4
<b>1.INTRODUCCIÓN</b> .....	5
1.1 Importancia del agua de consumo, origen y tratamiento.....	5
1.2 Fuentes naturales y artificiales de la radiactividad en el agua de consumo.....	7
1.3 Efectos para la salud de la radiación ionizante.....	8
1.4 Vigilancia radiológica del agua de consumo.....	8
1.5 La isla de Tenerife como caso de estudio.....	9
<b>2.OBJETIVOS</b> .....	10
<b>3. MATERIAL Y MÉTODO</b> .....	10
3.1 Muestreo, recepción y conservación de las muestras.....	10
3.2 Determinación de la actividad alfa total y beta total.....	11
3.3 Determinación de la concentración de K y actividad beta resto.....	12
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	13
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	19
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	20
<b>ANEXO I</b> .....	23
<b>ANEXO II</b> .....	24
<b>ANEXO III</b> .....	25

## RESUMEN

---

Este trabajo presenta el cribado radiológico realizado en el agua de consumo de Tenerife, mediante la determinación de la actividad alfa total y actividad beta resto (beta total excluido K40). Estos parámetros se utilizan para el control de la Dosis Indicativa (DI), la cual estima la ingesta máxima anual de radionúclidos presentes en el agua de consumo, ya sean de origen natural o artificial, siendo su valor 0,1 mSv/año.

Se tomaron 21 muestras de agua de dos tipos: directamente de los grifos de los consumidores (agua de consumo, procedente de redes de distribución pública) y de acuíferos (agua bruta de origen subterráneo, destinada a la producción de agua de consumo). La determinación de alfa total se llevó a cabo por el método de coprecipitación, y la de beta total, por evaporación. El análisis estadístico permitió la comparación radiológica de los dos tipos de agua.

El 57% de las muestras totales fueron aptas para el consumo desde el punto de vista radiológico, requiriendo el 43% restante, análisis adicionales para la determinación de los radionúclidos contribuyentes a emisión alfa, si bien esto se quedó fuera del alcance de este trabajo. En general, el agua obtenida de los grifos de los consumidores, y por tanto tratada, presentó menor carga radiactiva que el agua bruta, sin embargo, para maximizar la eliminación del contenido radiactivo del agua de consumo, deberían caracterizarse radiológicamente la totalidad de las masas de agua de origen.

Palabras clave: Tenerife, agua de consumo, cribado radiológico, radionúclidos.

## ABSTRACT

---

This master's thesis presents the radiological screening of water intended for consumption in Tenerife, by determining the total alpha activity and beta activity (total beta excluding K40) in 21 water samples taken on the island. These parameters are used to control the Indicative Dose (ID), which estimates the maximum annual intake of radionuclides present in drinking water, whether of natural or artificial origin, with a value of 0.1 mSv/year.

Twenty-one water samples of two types were taken: directly from consumers' taps (drinking water, coming from public distribution networks) and from aquifers (raw water of groundwater origin, intended for drinking water production). Total alpha was determined by co-precipitation and total beta by evaporation. Statistical analysis allowed the radiological comparison of the two types of water.

Of the total samples, 57% were fit for consumption from a radiological point of view, with the remaining 43% requiring further analysis for the determination of the radionuclides contributing to alpha emission, although this was outside the scope of this work. In general, the water obtained from consumers' taps, and therefore treated, had a lower radioactive load than the raw water, however, to maximise the removal of the radioactive content from the drinking water, the entire source water bodies should be radiologically characterised.

Keywords: Tenerife, drinking water, radiological screening, radionuclides.

## 1. INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Importancia del agua de consumo, origen y tratamiento

El agua es esencial para todos los seres vivos, representando en el ser humano alrededor del 70% de su peso corporal, siendo su incorporación a la dieta imprescindible. En la industria alimentaria el agua es empleada para elaborar, fabricar, conservar y manipular alimentos, como bebida de animales y riego de cosechas destinados al consumo humano, en la limpieza de superficies, objetos y materiales destinados a entrar en contacto con los alimentos.

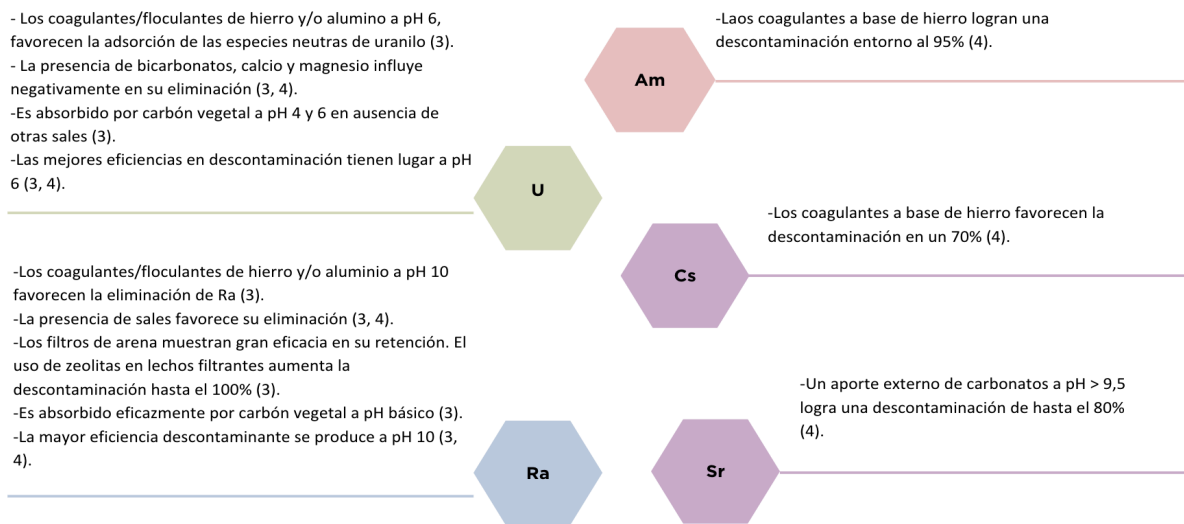
Conforme al *Real decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro* (1), (en adelante, RD 3/2023), se entiende por **agua de consumo**, aquella destinada al consumo humano, ya sea **en su estado original o después de tratamiento** utilizada para beber, cocinar, preparar alimentos, higiene personal u otros fines domésticos, debiendo estar libre de microorganismo, parásito o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un riesgo para la salud humana, y cumplir al menos, con los requisitos especificados en su anexo I.

El agua destinada al consumo puede proceder de masas de agua superficiales (lagos, embalses, corrientes, ríos, canales o aguas costeras), o bien de masas de agua subterránea, como acuíferos. Tras la captación, y antes de ser entregada a los usuarios, debe ser sometida a un tratamiento de potabilización, basado generalmente en al menos, una filtración seguida de una desinfección (art. 36, RD 3/2023) (1, 2). Dependiendo de las condiciones del agua a tratar, se realizarán otros tratamientos que se mencionan brevemente en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Tipos de tratamiento para potabilizar aguas superficiales y subterráneas destinadas al consumo humano (3).

Captación
Pretratamiento: <b>desbaste</b> , desarenación, tamizado
Precloración
Clarificación: eliminación de partículas coloidales por <b>coagulación-floculación + decantación</b>
Filtración
Desinfección
Tratamientos complementarios: <b>aireación, ajuste de pH, ablandamiento</b>

De estudios realizados con coagulantes/floculantes, filtros de arena, zeolitas y pH, tanto en laboratorio, como en plantas de tratamiento de aguas (3, 4), destacan los hallazgos mostrados en la Figura 1.



**Figura 1.** Efecto de los coagulantes/floculantes, filtros de arena, zeolitas y pH en la eliminación de radionúclidos presentes en el agua.

El agua puede verse afectada desde su origen y hasta la entrega al consumidor por la presencia de **contaminantes** de origen microbiológico, químico, o **radiológico** (5). El carácter radiactivo del agua radica en la presencia de sustancias radiactivas compuestas de uno o más radionúclidos, siendo éstas formas inestables que liberan radiación ionizante a medida que se desintegran.

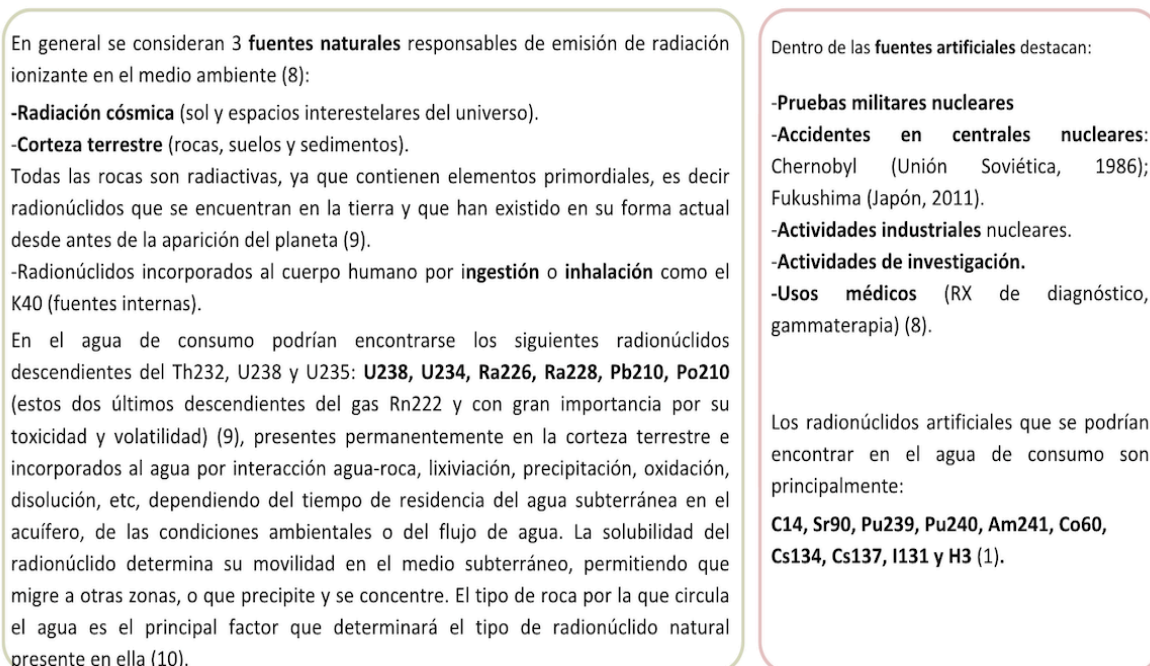
Existen tres tipos fundamentales de radiación ionizante: **partículas alfa ( $\alpha$ )**, **partículas beta ( $\beta$ )** y rayos gamma ( $\gamma$ ) (6). Las características de las dos primeras (objeto de este estudio) se muestran en la Figura 2.



**Figura 2.** Características generales de las partículas alfa y beta (6, 7).

## 1.2 Fuentes naturales y artificiales de la radiactividad en el agua de consumo

Las principales fuentes de la radiactividad en el agua de consumo quedan recogidas en la Figura 3.



**Figura 3.** Fuentes naturales y artificiales de la radiactividad en el agua de consumo.

La Tabla 2 muestra un resumen de los principales radionúclidos emisores de radiación ionizante alfa y beta presentes en el agua y su origen.

**Tabla 2.** Principales radionúclidos emisores alfa o beta de importancia en el agua de consumo y su origen (1, 9).

Radionúclido	Tipo de emisión	Origen/Fuente
Ra224, Ra226, Ra228, Th230, Th232, U234, U238, Po210	Alfa	Natural
Am241, Pu239, Pu240	Alfa	Artificial
Pb210	Beta	Natural
C14, Co58, Co60, Cs134, Cs137, H3, I129, I131, Sr89; Sr90	Beta	Artificial

Las exposiciones a fuentes naturales de radiación representan un 82% del total de la radiación recibida por el hombre (11).

### 1.3 Efectos para la salud de la radiación ionizante

Los principales daños para la salud se deben a la acción sobre el ADN, de cuya alteración derivan los dos principales efectos biológicos que se conocen y se explican en la Figura 4.



**Efectos DETERMINISTAS:** La gravedad del efecto aumenta con la dosis recibida una vez superado el umbral, pudiendo ser letal y provocar la **muerte en días o semanas**, si todo el cuerpo se ha expuesto a los altos niveles de radiación, o puede provocar un **simple enrojecimiento de la piel** si el tiempo de exposición ha sido corto pese a tratarse de altos niveles de radiación (12).

**Efectos ESTOCÁSTICOS:** Estos efectos no ocurren con seguridad, sino que tienen cierta *probabilidad de que ocurran en función de la dosis recibida*. Si bien la probabilidad de que se produzca un *efecto estocástico aumenta con la dosis, la gravedad del efecto es completamente independiente de la misma*. La lesión del efecto estocástico es subletal y no se produce en todas las células, sino que se da en una o pocas. Sus efectos son observables en el plazo de años ya que presenta un periodo de latencia elevado, y derivan de la transformación de las células, de forma que pueden dar lugar a enfermedades como el **cáncer** o a otra serie de **enfermedades congénitas** (13).

Figura 4. Principales efectos biológicos de la radiación ionizante.

### 1.4 Vigilancia radiológica del agua de consumo

Los requisitos radiológicos que debe cumplir el agua de consumo están contemplados en la parte E del Anexo I del RD 3/2023 (Tabla 3).

Tabla 3. a) Valores paramétricos de las sustancias radiactivas (RD 3/2023) con resaltado de los objetos de este estudio (1).

Parámetro	Valor paramétrico
Actividad alfa total	0,1 Bq/L
Actividad beta resto	1,0 Bq/L
Rn222	500 Bq/L
H3	100 Bq/L
Dosis Indicativa ( $\Sigma$ radionúclidos) DI	0,10 mSv/año



**Tabla 3.** b) Procedimiento general de actuación tras la determinación de la actividad alfa total y beta resto.

La **actividad alfa total y beta resto** (actividad beta total excluido K40), son considerados valores de cribado radiológico para el control de la **Dosis Indicativa** (DI), de forma que:

- si la concentración de actividad alfa total es inferior o igual a 0,1 Bq/L, y la concentración de actividad beta resto es inferior o igual a 1,0 Bq/L, se puede considerar que la DI es inferior o igual a 0,1 mSv/año, y no deberán realizarse investigaciones radiológicas adicionales (1).

-si la concentración de actividad alfa total y/o beta resto es superior a 0,1 Bq/L y 1 Bq/L respectivamente, se deberá realizar un análisis de radionúclidos específicos descritos en el anexo I (1).

### 1.5 La isla de Tenerife como caso de estudio

Tenerife es una de las 8 islas integrantes del archipiélago canario, de origen volcánico y rico en acuíferos sobre todo en las islas occidentales. En general en Canarias, el agua proviene principalmente de galerías, pozos y sondeos, salvo en las islas orientales de Fuerteventura y Lanzarote que provienen de la desalinización del agua de mar.

En Tenerife, el 80% del agua que se destina al consumo proviene de pozos y galerías, a diferencia de otros territorios peninsulares, donde procede de aguas superficiales (ríos y embalses). Solamente en Tenerife, existen más de 1.000 galerías y 400 pozos, que se han perforado para explotación (14).

De estudios anteriores realizados sobre el contenido radiológico en aguas en la isla de Tenerife, destacan los siguientes hallazgos:

-Superación de la actividad alfa total en el 66% de las muestras de aguas de grifo, en tres municipios de la isla de Tenerife (15).

-Superación de la actividad alfa total en el 57% de las muestras de agua subterránea de un total de 74 (10).

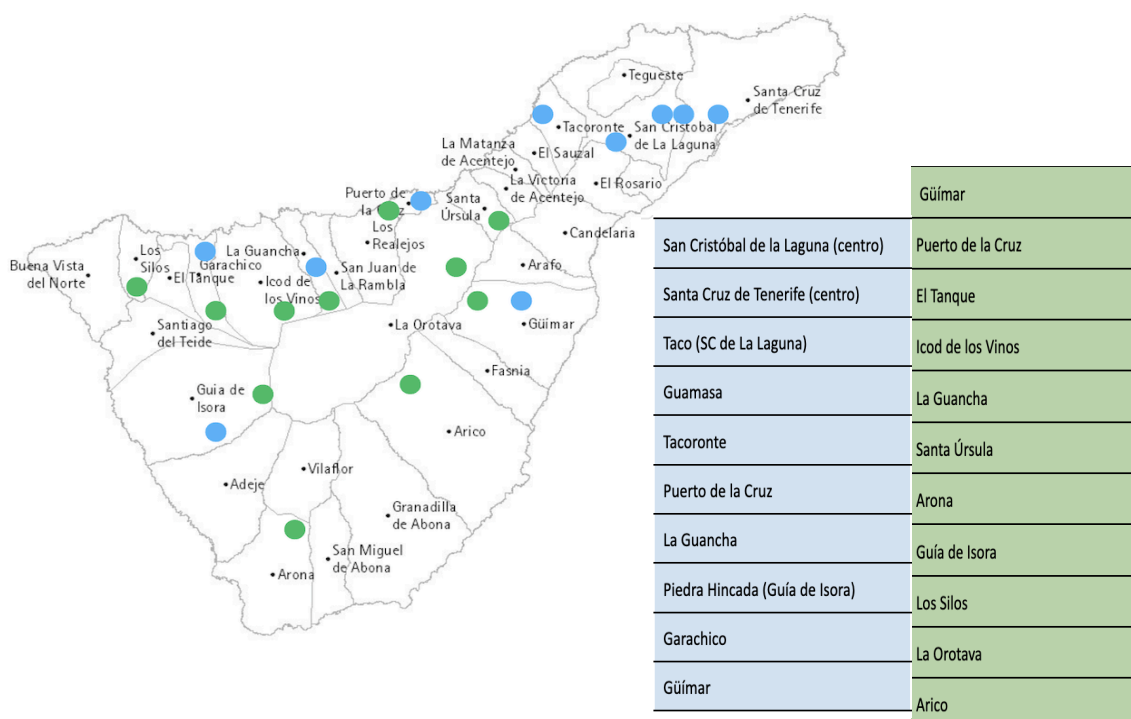
## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo ha sido realizar un cribado radiológico en muestras de agua destinada al consumo en la isla de Tenerife, mediante la determinación de la actividad alfa total y actividad beta resto (beta total excluido K40) empleando técnicas radiométricas, para así determinar la aptitud de dichas muestras, desde el punto de vista radiológico. Secundariamente, se ha realizado una comparación radiológica entre los tipos de agua estudiados, empleando el análisis estadístico.

## 3. MATERIAL Y MÉTODO

### 3.1 Muestreo, recepción y conservación de las muestras

Para realizar este estudio se tomaron, entre los meses de marzo y abril de 2024, 21 muestras de agua de dos tipos, en diferentes puntos de la isla de Tenerife, mostrados en la Figura 5.



**Figura 5.** Mapa de Tenerife con localización de puntos de muestreo (azul: muestreo en grifos; verde: muestreo en acuíferos).

10 muestras fueron tomadas directamente de los grifos de los consumidores (agua procedente de redes de distribución pública), y 11, de acuíferos (agua bruta de origen subterráneo, destinada a la producción de agua de consumo) desconociéndose la procedencia del agua de red, y por tanto la existencia o no de relación entre ambos tipos de agua.

Las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental (FIMERALL), el cual forma parte de la Red de Estaciones de Muestreo (REM) del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), y está adscrito al Servicio General de Apoyo a la Investigación (SEGAI) de la Universidad de La Laguna, donde se realizaron los ensayos. “FIMERALL” cuenta con Acreditación ENAC para la determinación de la actividad alfa total, actividad beta total y actividad beta resto en aguas de consumo, según requisitos de la norma UNE-EN ISO/IEC 17025:2017, cuyo alcance puede verse más detallado en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Detalle de alcance de la Acreditación nº 1164/LE1941 con la que cuenta FIMERALL

ENSAYO	NORMA/PROCEDIMIENTO DE ENSAYO (*)
<b>Aguas de consumo y Aguas envasadas</b>	
Actividad alfa total por coprecipitación y centelleo sólido ( <i>&gt; 0,001 Bq/l</i> )	PT-08, rev. 2 13/06/16 <b>Método interno basado en UNE-EN ISO 10704:2019</b>
Actividad beta total por detector proporcional ( <i>&gt; 0,048 Bq/l</i> )	PT-03, rev. 1 07/08/15 PT-10, rev. 1 06/06/17 PT-12, rev. 2 10/11/15
Actividad beta resto por detector proporcional ( <i>&gt; 0,048 Bq/l</i> )	<b>Método interno basado en UNE-EN ISO 10704:2019 y UNE 73340-2:2003</b>

(\*Se entenderá que el código indicado en esta columna corresponde a un procedimiento interno, a no ser que se especifique el documento normativo correspondiente)

Una vez en el laboratorio, todos los procesos se realizaron siguiendo Procedimientos Técnicos (PT) internos basados en directrices del CSN y normas UNE (16, 17).

A las muestras se les midió el pH y la conductividad, parámetros que dan una idea preliminar del carácter corrosivo o incrustante del agua y de la cantidad de sales disueltas respectivamente. Los resultados figuran en la Tabla 7. Posteriormente se acidularon con HNO<sub>3</sub> al 65% para conservarlas a pH<2 (18).

### 3.2 Determinación de la actividad alfa total y beta total

La determinación de los parámetros alfa total y beta resto, implica determinar también la actividad beta total y la debida al K40 (19), según la fórmula:

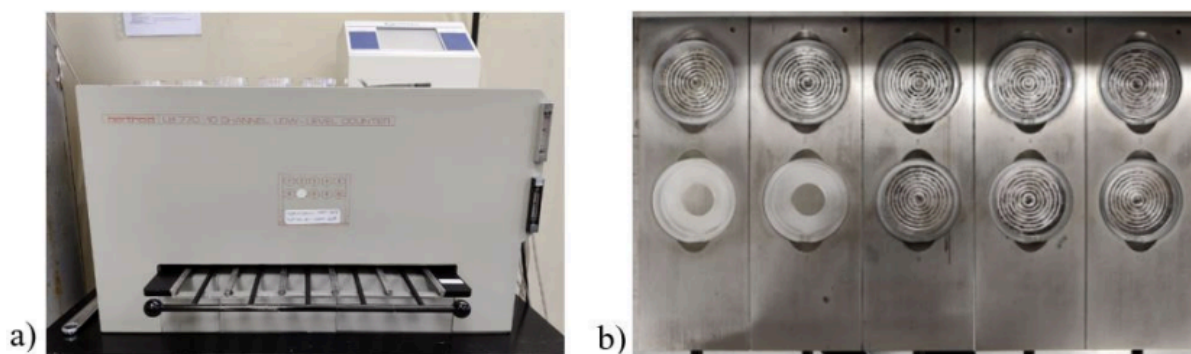
$$\text{Actividad beta resto} = \text{actividad beta total} - \text{actividad debida al K40}$$

La **determinación de beta total** se llevó a cabo mediante la **técnica de evaporación** usando placas calefactoras, hasta obtener un volumen de unos 5 mL. Éste se depositó en planchetas de acero inoxidable de 50 mm de diámetro con fondo estriado, las cuales se llevaron a desecación hasta generar un residuo seco homogéneo de peso inferior a 0.098 g (equivalente a una densidad

superficial  $< 5 \text{ mg/cm}^2$ ), con la finalidad de limitar los fenómenos de autoabsorción. Las muestras que no cumplieron estas condiciones fueron rechazadas (20).

**La determinación de alfa total** se llevó a cabo por el **método de coprecipitación** para lo cual volúmenes de unos 500 mL de agua se llevaron a ebullición en una placa calefactora con adición de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (eliminando así carbonatos y radón presentes en la misma). Posteriormente, se añadieron portadores de bario y de hierro, generando precipitados de sulfato de bario e hidróxido de hierro. El proceso requiere vigilancia de pH, temperatura y tiempos indicados en el procedimiento correspondiente. El precipitado formado se filtró al vacío, y el filtro junto con el residuo, se colocó en planchetas de acero descritas anteriormente para posterior medición (21). Esta vez, la medición se realizó en el equipo que se expone a continuación, y no en el equipo SZn como estaba previsto, dado que éste no se encontraba disponible.

Las planchetas con el residuo seco obtenido por ambos métodos, se mantuvieron en una cápsula de desecación provista de gel de sílice durante 2 días, para minimizar la contribución de los descendientes del radón. Tras esto, se introdujeron en el contador proporcional de flujo de gas de bajo fondo de muestras múltiples, modelo Berthold GmbH & Co K.G LB770 (Figura 6), previamente calibrado por personal del laboratorio según se describe en el Anexo I. Este equipo está conectado a un ordenador que dispone del software UMS 2000, con el que se obtienen las cuentas por minuto (cpm) alfa y beta de las muestras. Estos valores junto con los pesos iniciales de las planchetas, los residuos secos obtenidos, volúmenes de agua tomados, y datos de calibración aportados por el laboratorio, se introducen en un fichero Excel donde se aplican las fórmulas descritas en el Anexo II, para el cálculo de la actividad alfa total y beta total, incertidumbre y L.I.D (Límite inferior detectable).



**Figura 6.** a) Contador proporcional de flujo de gas de bajo fondo de muestras múltiples, modelo Berthold GmbH & Co K.G LB770 y b) detectores con planchetas listas para medir.

### 3.3 Determinación de la concentración de K y actividad beta resto

El procedimiento consiste en tomar por un lado, volúmenes de agua de entre 1 y 5 mL (dependiendo de la conductividad), y por otro, en hacer una curva de calibrado partiendo de una disolución patrón de 100 ppm de K preparada por personal del laboratorio, tomando volúmenes de 0.1, 0.25, 0.5, 0.75 y 1 mL (equivalentes a concentraciones de 0.2, 0.50, 1, 1.5 y 2 ppm respectivamente). El proceso se realiza por triplicado, empleando una disolución de CsCl de 1000 ppm para aforar en matraces de 50 mL. Las medidas se realizaron utilizando un equipo de Espectrometría de absorción atómica de llama, marca Perkin Elmer, modelo 2380, en las instalaciones del SEGAI. El valor de la concentración

de potasio se determinó por interpolación de su absorbancia en la curva de calibrado. La varianza interna de las tres réplicas debe ser menor o igual al 10% (22). Los resultados se llevaron a un fichero Excel. Las fórmulas y cálculos, así como los empleados para determinar la actividad debida al K40, se contemplan en el Anexo III.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos tras realizar el análisis estadístico descriptivo con los valores de la actividad alfa total (AAT), actividad beta total (ABT), actividad beta resto (ABR), y concentración de K, de las 21 muestras de agua, se exponen en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Resultados del análisis estadístico descriptivo de la actividad alfa total, beta total, beta resto y concentración de K, de las muestras de agua de red y subterránea.

Agua de red de distribución pública										
Parámetro	n	Media	Mediana	DT	Varianza	Asimetría	Curtosis	MG	Min	Max
Actividad alfa total (Bq/L)	10	0,080	0,081	0,049	0,002	-0,028	-0,743	0,051	0,001	0,158
Actividad beta total (Bq/L)	10	0,612	0,397	0,438	0,191	1,472	-0,067	0,482	0,146	1,485
Actividad beta resto (Bq/L)	10	0,031	0,027	0,077	0,006	0,058	0,923	-	-0,079	0,190
Concentración de K (ppm)	10	18,56	12,50	11,97	143,22	0,51	0,06	15,44	6,45	42,69
Agua de origen subterráneo										
Parámetro	n	Media	Mediana	DT	Varianza	Asimetría	Curtosis	MG	Min	Max
Actividad alfa total (Bq/L)	11	<b>0,184</b>	0,099	0,217	0,047	0,393	4,023	-	-0,004	0,739
Actividad beta total (Bq/L)	11	<b>1,193</b>	0,745	1,056	1,116	1,272	-0,798	0,808	0,146	3,018
Actividad beta resto (Bq/L)	11	0,158	0,108	0,14	0,02	0,349	-0,999	-	-0,014	0,389
Concentración de K (ppm)	11	34,12	20,33	30,51	930,56	0,45	-0,82	22,23	3,16	86,69

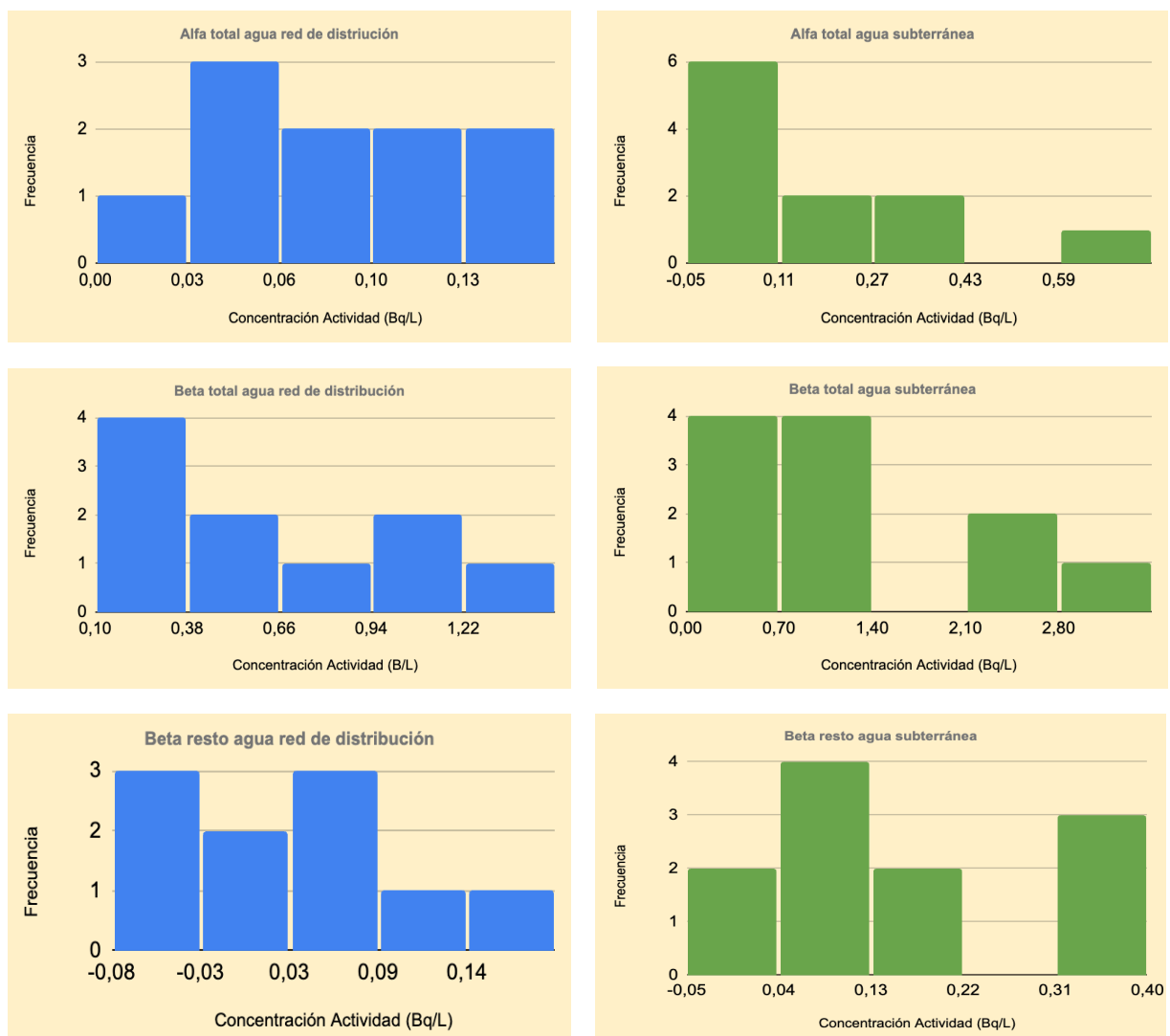
DT: Desviación estándar; MG: Media geométrica; n: número de muestras; AAT: Actividad alfa total; ABT: Actividad beta total; ABR: Actividad beta resto

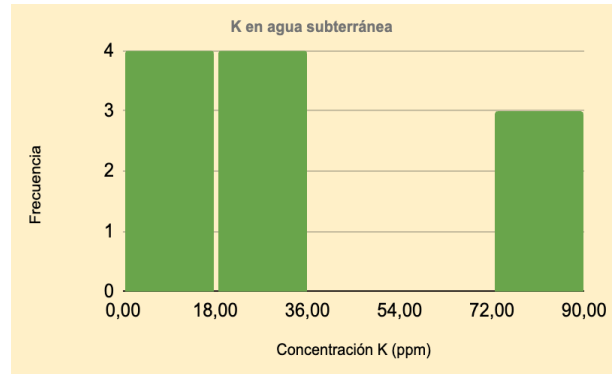
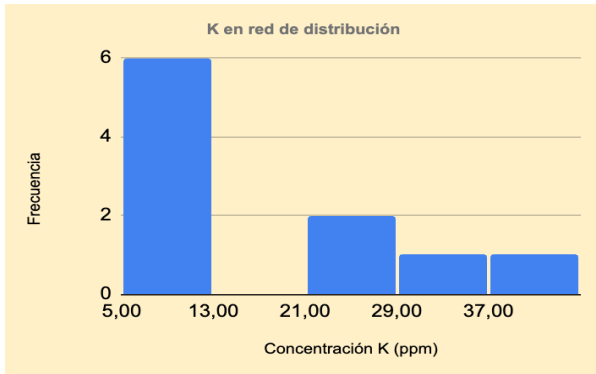
Para analizar de forma preliminar la posible distribución normal de los datos, se tienen en cuenta los valores de asimetría y curtosis. El valor de la asimetría de AAT y de ABR en el agua de red, es próxima a 0, por lo que se puede considerar que la distribución es más o menos simétrica y los datos se reparten uniformemente alrededor del punto central de la distribución. Respecto a la curtosis, todos los valores obtenidos para todos los parámetros analizados indican distribuciones platicúrticas o

aplanadas, salvo para AAT en agua subterránea que es leptocúrtica. Ningún parámetro refleja un comportamiento mesocúrtico o gaussiano.

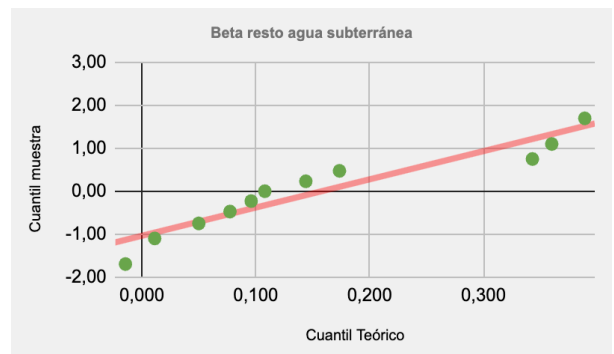
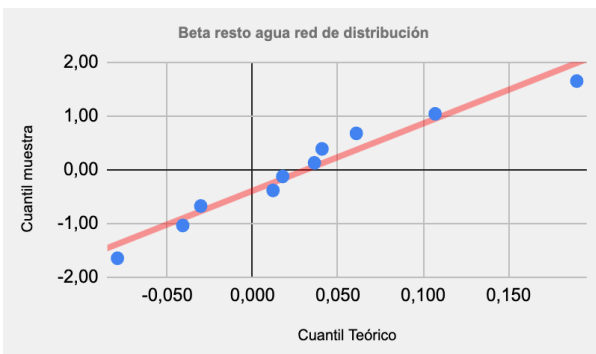
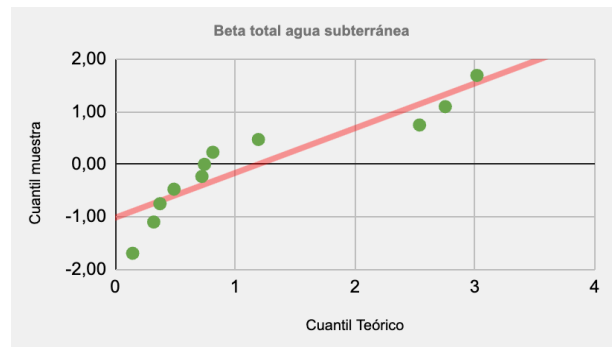
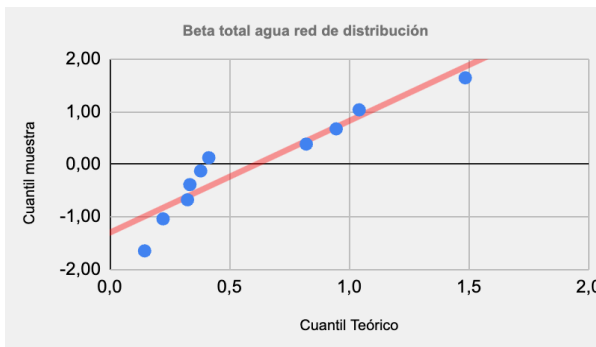
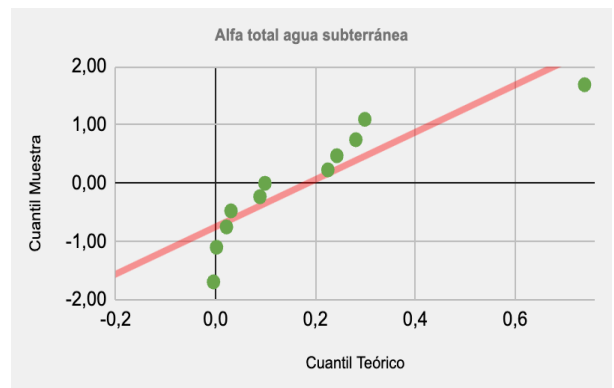
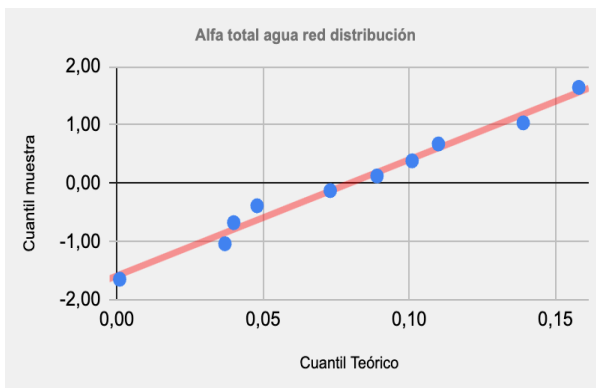
Para comprobar el comportamiento de la distribución de los datos obtenidos en ambos tipos de agua, se ha procedido a realizar diagramas de distribución de frecuencias (Figura 7) y de Cuantil-Cuantil (Figura 8), observándose que solo las concentraciones de la actividad alfa total y beta resto en agua de red, presentan a pesar de tener un pequeño sesgo hacia la izquierda, un comportamiento que se asemeja a una distribución normal. El parámetro en el que se observa mayor variabilidad y por tanto no se ajustaría a una distribución normal en ningún caso, es la concentración de actividad beta total, siendo más acusada para el caso de agua de origen subterráneo, donde se observan más muestras por encima y por debajo de la mediana, al igual que ocurre con el K.

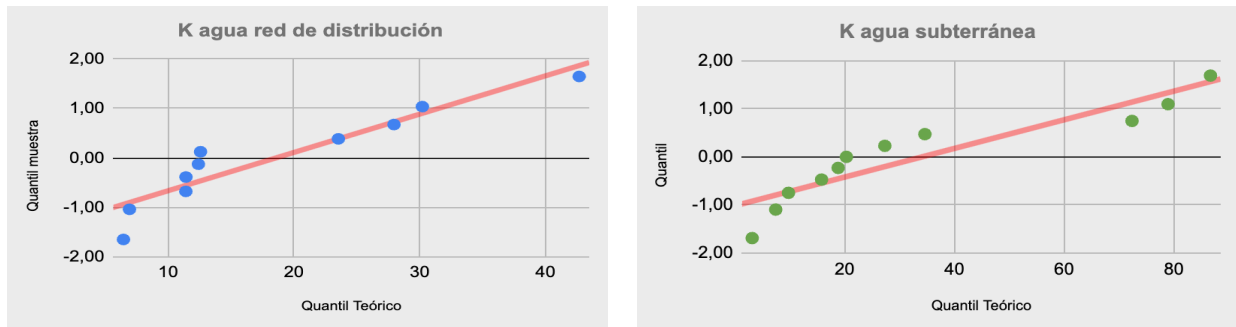
La variabilidad en los resultados de los parámetros radiológicos analizados puede deberse a las diferencias litológicas de los acuíferos de procedencia, siendo las rocas ígneas las que mayor radiactividad natural presentan (9). Según Araña y Novitsky en 1991, las rocas volcánicas de Canarias se clasifican en la serie ígnea sódico-alcalina propia del vulcanismo intra-placa (23). Esta variabilidad puede observarse en los diagramas de cajas y bigotes o Box-Plot (Figura 9).



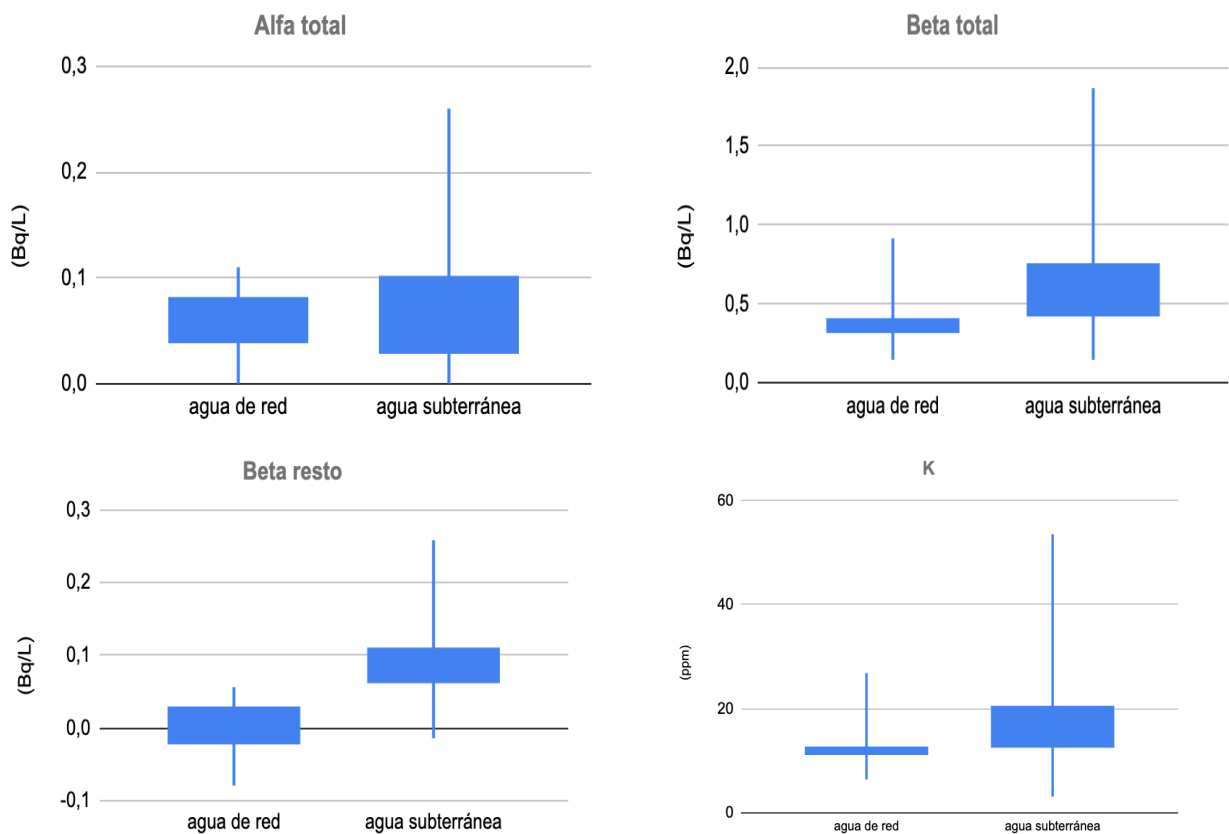


**Figura 7.** Diagramas de distribución de frecuencias para la AAT, ABT, ABR y concentración de K, en muestras de agua de red de distribución y de agua subterránea.





**Figura 8.** Diagramas cuantil-cuantil (Q-Q) para la AAT, ABT, ABR y concentración de K, en muestras de agua de red de distribución y de agua subterránea.

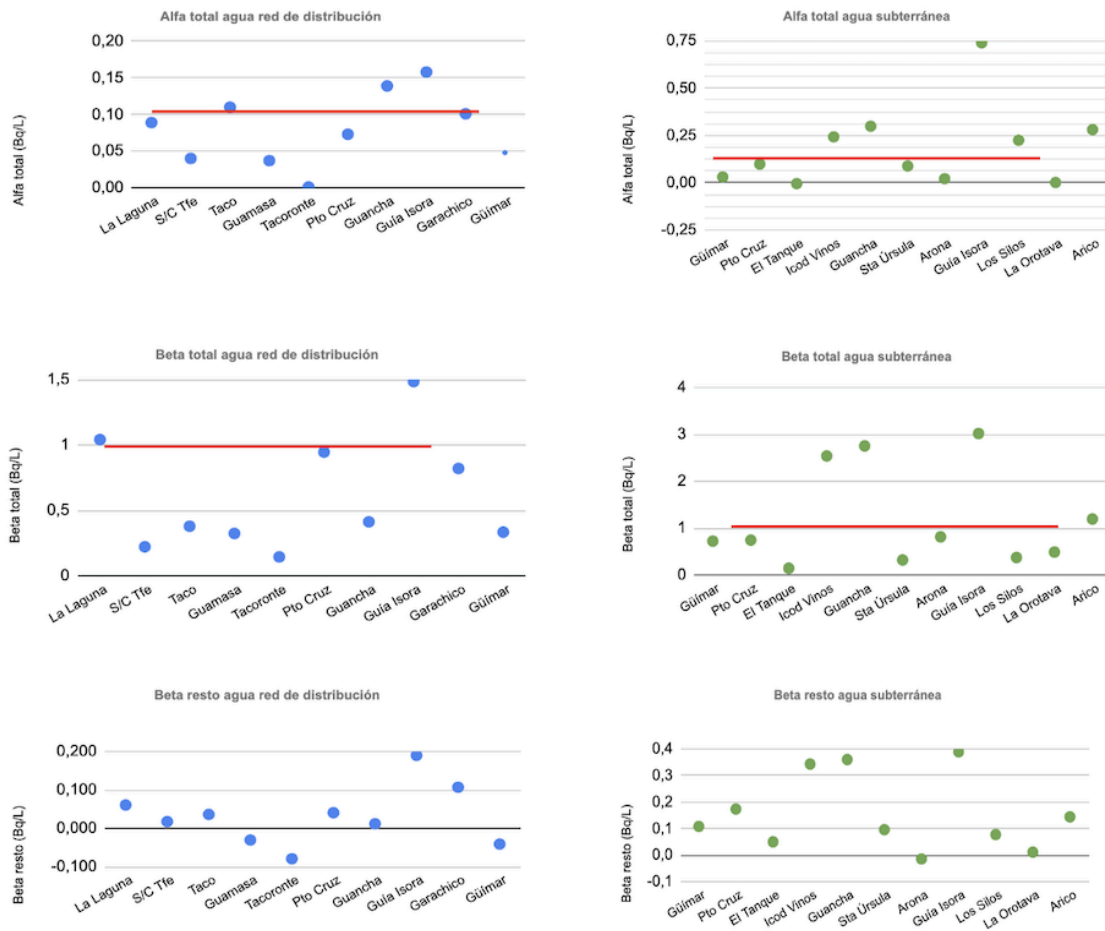


**Figura 9.** Comparativa de diagramas de cajas y bigotes (Box-plot) de la AAT, ABT, ABR y concentración de K, en muestras de agua de red de distribución y de agua subterránea.

Los valores de variables cuantitativas que no se ajustan a una distribución normal, se han expresado como media geométrica (cuando ha sido posible, dado la imposibilidad en ocasiones por la presencia de valores negativos) y rango (valores mínimo y máximo). La media para la actividad alfa total de las aguas de red y subterráneas ha sido de  $0,08 \pm 0,04$  Bq/L y  $0,184 \pm 0,07$  Bq/L respectivamente, con un rango de actividad de 0,01 a 0,158 Bq/L y -0,004 a 0,739 Bq/L respectivamente, superando el 40% de las muestras de agua de red, el valor límite de 0,1 Bq/L, con un 27% de superación de media, frente al 45% de las muestras en el caso del agua subterránea, con una media de superación del 257 %. La



media para la actividad beta total y beta resto fue de  $0,612 \pm 0,049$  Bq/L y  $1,193 \pm 0,067$  Bq/L (beta total) y para beta resto, de  $0,031 \pm 0,05$  y  $0,158 \pm 0,067$  Bq/L para agua de red y subterránea respectivamente. El 70% muestras de agua de red presentaron valores de actividad beta resto por debajo del L.I.D ( $0,048$  Bq/L), frente a poco más del 9% en el caso del agua subterránea. No se observó superación del valor límite de beta resto ( $1$  Bq/L) en ninguno de los dos tipos de muestras de agua, tal y como puede comprobarse en los diagramas de dispersión (Figura 10).



**Figura 10.** Diagramas de dispersión de AAT, ABT y ABR para muestras de agua de red y subterránea, con franja roja indicando nivel umbral establecido.

Del cálculo de la actividad debida al K40 según fórmulas descritas en el Anexo III, se observa que éste es el principal contribuyente de la emisión beta, siendo las medias de ABT:  $0,612$  Bq/L y  $1,193$  Bq/L, y de ABR:  $0,031$  Bq/L y  $0,158$  Bq/L, para agua de red y subterránea respectivamente.

Por tanto, de los dos parámetros empleados como cribado radiológico (alfa total y beta resto), sólo se observó superación paramétrica de alfa total en ambos tipos de agua, siendo esta superación más acusada para el agua de origen subterráneo ( $0,184$  Bq/L de media en acuíferos, frente a  $0,080$  Bq/L de media en red). La distribución espacial de dicha superación se muestra por orden decreciente en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Localidades muestreadas con superación del umbral de alfa total y % de superación.

<b>% Superación actividad alfa total respecto al valor umbral (0,1 Bq/L)</b>			
<b>Agua de red de distribución pública</b>		<b>Agua de origen subterráneo</b>	
	<b>% superación</b>		<b>% superación</b>
<i>Guía de Isora (0,158 Bq/L)</i>	<b>58%</b>	<i>Guía de Isora (0,739 Bq/L)</i>	<b>639%</b>
<i>La Guancha (0,139 Bq/L)</i>	<b>39%</b>	<i>La Guancha (0,299 Bq/L)</i>	<b>199%</b>
San Cristóbal de La Laguna (0,110 Bq/L)	10%	Arico (0,281 Bq/L)	181%
Garachico (0,101 Bq/L)	1%	Icod de los Vinos (0,243 Bq/L)	143%
		Los Silos (0,225 Bq/L)	125%
$\bar{x}$ superación= <b>27%</b>		$\bar{x}$ superación= <b>257,4 %</b>	

Las aguas con valores más altos de actividad alfa total mostradas en la Tabla 6, se localizaron en la zona suroeste y noreste de la isla de Tenerife. En esta franja, las aguas podrían proceder del acuífero de Las Cañadas del Teide ubicado en la zona central de la isla, y poseer, un alto grado de mineralización, del tipo Na-HCO<sub>3</sub>, debido al transporte de gases disueltos producidos por la actividad volcánica, principalmente CO<sub>2</sub> (24). Este hecho coincide con los valores de conductividad obtenidos en estas zonas, mostrados en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Valores de pH y conductividad de las muestras de agua, con resaltado en naranja de las que han superado alfa total en red de distribución, y amarillo, en aguas subterráneas.

<b>Agua de red de distribución pública</b>			<b>Agua de origen subterráneo</b>		
<b>Localidad</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad (μS/cm)</b>	<b>Localidad</b>	<b>pH</b>	<b>Conductividad (μS/cm)</b>
San Cristóbal de la Laguna (centro)	8,5	950	Güímar	7,8	1100
Santa Cruz de Tenerife (centro)	8,1	640	Puerto de la Cruz	8,0	610
Taco (SC de La Laguna)	7,8	750	El Tanque	7,8	260
Guamasa	8,3	610	Icod de los Vinos	6,7	1850
Tacoronte	8,2	390	La Guancha	6,9	1660
Puerto de la Cruz	8,7	780	Santa Úrsula	8,4	580
La Guancha	7,8	340	Arona	6,5	980
Piedra Hincada (Guía de Isora)	7,9	1220	Guía de Isora	7,6	1930
Garachico	8,5	860	Los Silos	8,1	1100
Güímar	8,2	770	La Orotava	8,4	580
			Arico	7,6	1260

En la tabla 7 puede observarse que en La Guancha y Guía de Isora, localidades donde se ha muestreado agua de los dos tipos, la conductividad es significativamente inferior en red, que en agua subterránea (340 vs 1660 y 1220 vs 1930 μS/cm respectivamente).

Según RD 3/2023, cuando hay superación del valor umbral para alfa total, debe procederse a la determinación de la concentración de radionúclidos contribuyentes a dicha radiación ionizante alfa, sin bien esto quedó fuera del alcance de este estudio. De estudios realizados con anterioridad en aguas subterráneas en Tenerife, se sabe que los principales radionúclidos contribuyentes a la emisión alfa total son los que se indican en el siguiente orden: U234> U238> Pb210> U235> Th230> Po210> Th232> Ra>226 (25).

## 5. CONCLUSIONES

---

En el cribado radiológico realizado en 21 muestras de agua procedentes de redes de distribución pública y de acuíferos, tomadas en Tenerife, se comprobó la presencia de radiactividad en las mismas, siendo un 57% del total, aptas para el consumo desde el punto de vista radiológico.

En ambos tipos de agua hubo superación del parámetro actividad alfa total, si bien sólo las aguas subterráneas superaron, en media, el nivel umbral establecido (0,1 Bq/L).

Teniendo en cuenta el origen volcánico, la procedencia mayoritariamente subterránea del agua en Tenerife, así como lo observado en estudios anteriores, puede afirmarse que la radiactividad del agua en la isla es de origen natural.

En general todos los parámetros radioquímicos analizados en este trabajo, dieron valores más bajos en el agua obtenida de los grifos de los usuarios, que en el agua bruta. En Canarias, el agua de consumo puesta a disposición de los consumidores debe recibir un tratamiento de potabilización consistente en al menos una filtración seguida de una desinfección, por lo que dichos tratamientos podrían ser los responsables de la reducción de la carga radiactiva del agua de red, respecto a la observada en acuíferos, ejerciendo un papel descontaminante.

Para maximizar la eliminación del contenido radiactivo del agua, y/o lograr la eliminación total, deberían caracterizarse radiológicamente la totalidad de las masas de agua de origen, así como incrementar la investigación al respecto. De esta forma, se podrían implantar eficazmente, técnicas de descontaminación y garantizar un elevado nivel de protección radiológica de la salud de la población abastecida.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Real decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. BOE núm. 9, (11 Enero 2023).
- (2) Martín M, Fernández MC, Pita ML. Programa de Vigilancia sanitaria del agua de consumo humano, Comunidad Autónoma de Canarias. Santa Cruz de Tenerife: Servicio de Sanidad Ambiental, Dirección General de Salud Pública del Servicio Canario de la Salud. Consejería de Sanidad del Gobierno de Canarias; 2009.
- (3) Salas A. Estudio de la eficiencia de la eliminación de radionúclidos naturales en procesos compatibles con el de potabilización de las aguas. (Tesis Doctoral). Cáceres: Universidad de Extremadura; 2005.
- (4) Consejo de Seguridad Nuclear. Potabilización radiológica del agua de consumo humano. Referencia INT-04.14. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear; 2007. Colección de informes técnicos 18.2007.
- (5) Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (Internet). Seguridad alimentaria: Contaminación radioactiva. (Consultado el 1 de abril de 2024). Disponible en: [https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad\\_alimentaria/subdetalle/contaminacion\\_radioactiva.htm](https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad_alimentaria/subdetalle/contaminacion_radioactiva.htm)
- (6) Foro de la Industria Nuclear Española. Tipos de radiaciones ionizantes. (Consultado el 1 de abril de 2024). Disponible en: <https://www.rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/tipos-de-radiaciones-ionizantes>
- (7) Sociedad Española de Protección radiológica. Gestión de la Radiactividad en el agua de consumo (Internet): OMS; 2022. ISBN: 978-84-09-4504. (Consultado el 5 de abril de 2025). Disponible en: <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241513746>
- (8) Consejo de Seguridad Nuclear. El CSN vigila las radiaciones. 10 preguntas y respuestas sobre la radiactividad. (Monografía en Internet). Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear; 2006. (Consultado el 5 de abril de 2024). Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/136297/csnvigilaok.pdf/5be8c10d-df4f-47b4-bfb0-ef0412f72b6a>
- (9) Ministerio de Sanidad. Análisis de los riesgos derivados de la exposición de la población a las sustancias radiactivas en el agua de consumo humano. Madrid: Ministerio de Sanidad; 2019. Disponible en: [https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/RADIATIVIDAD\\_EN\\_ACH\\_V2.pdf](https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/RADIATIVIDAD_EN_ACH_V2.pdf)
- (10) López-Pérez M. Caracterización radiológica ambiental de las Islas Canarias Occidentales. (Tesis Doctoral). Santa Cruz de Tenerife: Universidad de La Laguna; 2022.

- (11) Sources and effects of ionizing radiation. Volumen I. United Nations: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR); 2020. ISBN: 92-1-142238-8. Available from: [https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf)
- (12) Consejo de Seguridad Nuclear. Protección radiológica; s.f. (Consultado el 26 de junio de 2024). Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/950714/Curso+General+de+Formaci%C3%B3n+de+Actuantes+en+Emergencias+Nucleares.+TEMA+04.+Protecci%C3%B3n+radiol%C3%B3gica/1c1ad9ff-7238-4c51-8e67-e5a0d89eeacd>
- (13) Gallego E. Radiaciones ionizantes y protección radiológica. Foro de la industria nuclear española; 1999. (Consultado el 26 de junio de 2024). Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/237682635\\_RADIACIONES\\_IONIZANTES\\_Y\\_PROTECCION\\_RADIOLOGICA/link/5d721693299bf1cb808ad37e/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19](https://www.researchgate.net/publication/237682635_RADIACIONES_IONIZANTES_Y_PROTECCION_RADIOLOGICA/link/5d721693299bf1cb808ad37e/download?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19)
- (14) Consejo Insular de Aguas de Tenerife. Censo de instalaciones subterráneas, galerías y pozos, de la Isla de Tenerife; 2018. Disponible en: [https://www.aguastenerife.org/9\\_OCAS/pdf/OCAS\\_InfGeneral\\_2018\\_corto.pdf](https://www.aguastenerife.org/9_OCAS/pdf/OCAS_InfGeneral_2018_corto.pdf)
- (15) Hernández-Armas J, Hernández F, Karlsson L, López M, Catalán A, Fernández JC. Radionúclidos en agua y dietas elaborados en Tenerife y dosis colectiva. Rev SEPR XIV. 2007; 29-282.
- (16) Asociación Española de Normalización. UNE-EN ISO 10704:2019. Calidad del Agua. Medición de la actividad alfa y beta total en agua no salina. Método de deposición de una capa delgada. Madrid: Asociación Española de Normalización; 2019.
- (17) Asociación Española de Normalización. UNE-EN ISO 73340-2:2003. Procedimiento para la determinación de la radiactividad ambiental. Métodos analíticos. Parte 2: Índice de actividad beta resto en aguas mediante contador proporcional. Madrid: Asociación Española de Normalización; 2003.
- (18) Consejo de Seguridad Nuclear. Procedimiento para el muestreo, recepción y conservación de muestras de agua para la determinación de la radiactividad ambiental. Serie Vigilancia Radiológica Ambiental. Procedimiento 1.15. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear; 2009. Colección Informes Técnicos 11. 2009.
- (19) FIMERALL. Procedimiento técnico PT\_12\_Determinación de Beta resto. Rev. 02; 2015.
- (20) FIMERALL. Procedimiento técnico PT\_03\_Ensayo Beta total. Rev. 01; 2015.

- (21) FIMERALL. Procedimiento técnico PT\_08\_Ensayo de alfa total por coprecipitación. Rev. 02; 2016.
- (22) FIMERALL. Procedimiento técnico PT\_10\_Determinación de Potasio. Rev. 01; 2017.
- (23) Gobierno de Canarias. Geología de las islas (Internet). CanariWiki: Consejería de Educación, Formación Profesional, Actividad Física y Deportes. s.f. (Consultado el 26 de junio de 2024). Disponible en: [https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Geolog%C3%ADa\\_de\\_las\\_islas](https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/wiki/index.php?title=Geolog%C3%ADa_de_las_islas)
- (24) Marrero R. Modelo hidrogeoquímico del acuífero de las cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias. (Tesis Doctoral). Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya; 2010. (Consultado el 27 de junio de 2024). Disponible solo resumen en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93589>
- (25) López-Pérez M, Martín C, Catalán A, y Salazar PA. Estimation of radiation doses due to groundwater intake at a volcanic island: Tenerife (Canary Islands, Spain). Elsevier. 2022; 135:108830. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713522000238>
- (26) FIMERALL. Procedimiento técnico PT\_04\_Equipos. Rev. 08; 2021.

## ANEXO I

### **Calibración del contador proporcional de flujo de gas de bajo fondo de muestras múltiples.** (Extraído del documento de FIMERALL: PT\_04\_Equipos, (26)).

Cada vez que se enciende el contador, y antes de comenzar con las medidas, se realiza una verificación del equipo. Para ello en primer lugar, se lleva a cabo una medida del **fondo** con planchetas de acero inoxidable, mediante 20 ciclos de 60 min, para alfa y beta. Con los valores obtenidos se comprueba que en ambos casos se encuentren dentro del rango establecido de cuentas por minuto (cpm) ( $\leq 0,1$  cpm para alfa y  $\leq 1,0$  cpm para beta).

Se utilizaron planchetas con residuos con actividades conocidas: una con Am241 de  $27,2 \pm 0,8$  Bq de actividad alfa, y otra plancheta de Sr90/Y90 de  $100 \pm 2$  Bq de actividad beta, preparadas con el mismo procedimiento que las muestras, para permitir así la determinación de factores de absorción. Se aplicaron correcciones de autoabsorción a los resultados para la densidad de masa obtenida para cada muestra.

## ANEXO II

**Fórmulas aplicadas en el fichero Excel para el cálculo de la actividad alfa total, beta total, incertidumbre y el LID.** (Extraídas de los documentos de FIMERALL: PT\_03\_Ensayo Beta total y PT\_08\_Ensayo alfa total por Coprecipitación (20, 21)).

- Actividad alfa total:

$$\frac{((cpm\ alfa - cpm\ fondo\ alfa) \times factor\ de\ autoabsorci3n\ alfa) / (\% \text{ eficiencia alfa} \times 60)}{peso\ seco\ inicial}$$

- Actividad beta total:

$$((cpm\ beta - cpm\ fondo\ beta) - (cpm\ alfa - cpm\ fondo\ alfa) \times \% \text{ spillover alfa}) \times \frac{factor\ de\ autoabsorci3n\ beta}{(\% \text{ eficiencia beta} \cdot peso\ seco\ inicial \times 60)}$$

- Incertidumbre de la actividad alfa total:

$$2 \times factor\ de\ autoabsorci3n\ alfa \times \sqrt{\frac{((cpm\ fondo\ alfa + cpm\ alfa) / 1.200) / (\% \text{ eficiencia alfa} \times 60)}{peso\ seco\ inicial}}$$

- Incertidumbre de la actividad beta total:

$$2 \times factor\ de\ autoabsorci3n\ beta \times \sqrt{\frac{(cpm\ fondo\ beta + cpm\ beta) / 1.200}{(\% \text{ eficiencia beta} \times peso\ seco\ inicial \times 60)}}$$

- Límite inferior de detección de la actividad alfa total:

$$\frac{3,36 \times factor\ de\ autoabsorci3n\ alfa \times \sqrt{(2 \times cpm\ fondo\ alfa / 1.200) / (\% \text{ eficiencia alfa} \times 60)}}{peso\ seco\ inicial}$$

- Límite inferior de detección de la actividad beta total:

$$3,36 \times factor\ de\ autoabsorci3n\ beta \times \sqrt{(2 \times cpm\ fondo\ beta / 1.200) / (peso\ seco\ inicial \times \% \text{ eficiencia alfa} \times 60)}$$

**El límite inferior de detección (LID)** medio del contador proporcional de bajo fondo fue de 0,075 Bq/L y 0,099 Bq/L para la actividad alfa y beta respectivamente. La **eficiencia** fue entre 21 - 24% para alfa y del 38-45% para beta. Debido a la baja concentración de emisores alfa y beta en las muestras de agua, se utilizó un tiempo de recuento de 1200 minutos (20 ciclos de 60 minutos) en cada medición para la mayoría de las muestras.



### ANEXO III

**Fórmulas aplicadas en el fichero Excel para el cálculo de la concentración de K y actividad beta resto en muestras de agua.** (Extraídas de los documentos de FIMERALL: PT\_10\_Determinación de potasio y PT\_12\_Determinación de Beta resto, (22, 19)).

- Cálculo de la concentración de potasio en la muestra. El valor de la concentración de potasio se determinara por interpolación de su absorbancia en la curva de calibrado.

$$[k] = \left( \frac{y-b}{m} \right)$$

Donde:

y= absorbancia

m= sensibilidad de calibración del método en L/mg de K.

[k]= concentración de potasio, expresada en ppm.

b= intercepto, error sistemático.

- Cálculo del índice de la incertidumbre expandida de la concentración de potasio, para un factor de cobertura "K"= 2 (nivel de confianza del 95%), se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$U_{EK} = u_K * "K"$$

$U_{EK}$ : es la incertidumbre expandida de la medida del potasio en el espectrofotómetro de llama, en ppm.

$u_K$ : incertidumbre combinada de la medida del potasio en el espectrofotómetro de llama, en ppm.

"K": es el factor de cobertura que corresponde a un nivel de confianza del 95%. Este factor es igual a 2.

- Cálculo de la media ponderada de la concentración de potasio, de la tres réplicas que se han preparado

$$k_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{[K]}{U_{EK}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{EK}^2}}$$

Donde:

$k_p$ = media ponderada de la concentración de potasio, expresada en mg/l(ppm)

[K]: es la concentración de potasio de cada réplica. Se expresa en mg/l (ppm)

$U_{EK}$ : es la incertidumbre expandida de cada medida de potasio en el espectrofotómetro de llama, en ppm.

- Cálculo del índice de la varianza interna de las tres réplicas, para un factor de cobertura K= 2 (nivel de confianza del 95%)

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{EK}^2}}}$$

Donde:

$\sigma_i$ = varianza interna de la concentración de potasio expresada en mg/l

$U_{EK}$ : es la incertidumbre expandida de la medida del potasio en el espectrofotómetro de llama, en ppm.

La incertidumbre expandida de la media se expresa como varianza interna

- Cálculo de actividad beta resto, según fórmula:  $A_{\beta r} = A_{\beta t} - A_{40K}$

Donde:

$A_{\beta r}$ : es la actividad beta resto de la muestra, en Bq/m<sup>3</sup>

$A_{\beta t}$ : es la actividad beta total de la muestra, en Bq/m<sup>3</sup>

A 40K: es la actividad debida al 40K, en Bq/m<sup>3</sup>

$$A_{40K} = (F_k * [K] * 1000 * E_k) / E_{\beta}$$

Donde:

A 40K: actividad debida al 40K, en Bq/m<sup>3</sup>

F<sub>k</sub>: factor de conversión de mg de K a cps, es igual a 0.02769 Bq/mg.

[K]: es la concentración de potasio medida en el espectrofotómetro de llama, en mg/l (ppm).

E<sub>k</sub>: es la eficiencia de contaje del 40K, en tanto por uno.

E<sub>β</sub>: es la eficiencia de recuento correspondiente a la muestra de calibrado de "90Sr+90Y, MRC 2010-157 y/o MRC 2010-158", medida en el contador proporcional.

- **Cálculo de la incertidumbre expandida para el beta resto**, para un factor de cobertura "K" = 2, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$UE A_{\beta t} = u A_{\beta r} * "K"$$

UE  $A_{\beta r}$ : es la incertidumbre expandida en la determinación de la actividad beta resto, en Bq/m<sup>3</sup>

"K": es el factor de cobertura que corresponde a un nivel de confianza del 95%.

Este factor es igual a 2.

- **Cálculo del Límite inferior de detección (L.I.D)** de la actividad beta resto. La actividad mínima detectable de la actividad beta resto es equivalente a la actividad mínima detectable de la actividad beta total porque la contribución de la actividad mínima detectable de la concentración del potasio es insignificante.

$$L.I.D. A_{\beta r} = L.I.D. A_{\beta t}$$

Donde,

L.I.D  $A_{\beta r}$ : es la actividad beta mínima detectable de la actividad beta resto, en Bq/m<sup>3</sup>

L.I.D  $A_{\beta t}$ : es la actividad beta mínima detectable de la actividad beta total, en Bq/m<sup>3</sup>