

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

FACULTAD DE CIENCIAS

INGENIERÍA GEOLÓGICA



TRABAJO FIN DE CARRERA

**RADIATIVIDAD NATURAL
EN
MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

CARLOS GONZÁLEZ NEILA

2008

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

INGENIERÍA GEOLÓGICA



TRABAJO FIN DE CARRERA

RADIATIVIDAD NATURAL

EN

MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Por:

CARLOS GONZÁLEZ NEILA

Para la obtención del título de Ingeniero Geólogo

Tutores del Proyecto:

MARÍA DOLORES PEREIRA GÓMEZ

LUIS JOSÉ PROENÇA DE FIGUEIREDO NEVES

2008

Dña. María Dolores Pereira Gómez, Profesora Titular del Área de Petrología y Geoquímica del Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca.

D. Luis José Proença de Figueiredo Neves, Profesor Catedrático del Área de Mineralogía, Petrología y Geoquímica del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Coimbra.

CERTIFICAN:

Que el Trabajo Fin de Carrera titulado “Radiactividad Natural en Materiales de Construcción” ha sido realizado bajo su tutela por D. Carlos González Neila.

Salamanca, 25 de septiembre de 2008.

Dr. D. Luis José Proença de Figueiredo Neves

Dra. D. María Dolores Pereira Gómez

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a uno de mis tutores, la Dra. Dña. Dolores Pereira todo su esfuerzo dedicación y entrega, pero sobretodo agradecerle la confianza que puso en mí y que me ha demostrado desde el primer día

Quiero agradecer también especialmente a mi otro tutor, Dr. D. Luis Figueiredo Neves y a Dr. D. Alcides Castilho Pereira por darme esta oportunidad única y poner a mi disposición toda su experiencia y sabiduría para ayudarme en la realización de este trabajo.

Quiero dar las gracias a Ana Margarida y especialmente a Paulo Norte, del equipo del laboratorio de Coimbra por toda su entrega y orientación con los ensayos porque sin su ayuda no habría podido realizar este trabajo.

Gracias a mi familia, en especial a mis padres y a mi hermana por su confianza durante todos estos años.

Gracias a Raquel, por estar a mi lado siempre y porque aun en la distancia sigues siendo un ejemplo de esfuerzo y de trabajo.

A Ana, a Fran a Félix y a Fernando por su amistad, su apoyo y su ayuda durante todo este tiempo.

A mis compañeros, amigos y a veces hermanos. Gracias por estos años y por vuestra amistad pasada, presente y futura.

Este trabajo ha sido financiado parcialmente con fondos del proyecto de referencia CGL2006 – 05128 del Ministerio de Ciencia e Innovación.



Este trabajo se ha realizado en el marco de colaboración entre el Laboratorio de Radiactividad Natural de la Universidad de Coimbra y miembros del departamento de Geología de la Universidad de Salamanca.

Hay cosas, que la voluntad humana no es capaz de controlar,...

Miguel Delibes

Venid amigos, no es tarde para buscar un mundo nuevo, pues sueño con navegar más allá del crepúsculo y, aunque ya no tengamos la fuerza que antaño movió cielos y tierra, somos lo que somos: un mismo temple de corazones, debilitados por el tiempo, pero voluntariosos para luchar, buscar y encontrar y no rendirse.

Alfred Lord Tennyson



ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 LA RADIATIVIDAD NATURAL	11
1.2 LA RADIATIVIDAD ARTIFICIAL	13
1.3 MEDIDA DE LA RADIATIVIDAD NATURAL	14
1.4 EFECTOS DE LA RADIACION	15
1.5 LEGISLACIÓN	16
2. LAS ROCAS NATURALES	21
2.1 DEFINICIÓN	21
2.2 NOMBRE CIENTÍFICO / NOMBRE COMERCIAL	21
2.3 TIPOS DE ROCAS	22
2.4 EL SECTOR EN ESPAÑA Y PORTUGAL	22
3. ANTECEDENTES AL TRABAJO	28
4. MEDICIÓN DE RADÓN	39
4.1 MEDICIÓN DE RADÓN EN EL LABORATORIO	39
4.2 NIVELES DEL RADÓN O SUS DESCENDIENTES	40
4.3 RADÓN EN INTERIORES DEBIDO A LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	41
4.4 VARIACIONES DE PERIODO CORTO EN LOS NIVELES DE RADÓN	41
4.5 VARIACIONES ESTACIONALES EN LOS NIVELES DE RADÓN INTERIORES	42
4.6 CONCLUSIONES PRINCIPALES DE LA MEDICIÓN DE RADÓN	43
5. OBJETIVOS	45
6. LAS ROCAS DEL ESTUDIO	47
6.1 GRANITO “GRIS LOS SANTOS”	50



6.2 GRANITO “ROJO SAYAGO”	52
6.3. GRANITO “AZUL PLATINO”	54
6.4 GRANITO “BRANCO MICAELA”	56
6.5 GRANITO “CINZENTO CLARO”	58
6.6 SERPENTINITA “VERDE PIRINEOS”	60
6.7 SERPENTINITA “VERDE MACAEL”	62
7. METODOLOGÍA DEL TRABAJO	65
7.1 EXHALACIÓN DE RADÓN AL AIRE	66
7.2 EXHALACIÓN DE RADÓN AL AGUA	69
8. RESULTADOS	72
8.1 ANÁLISIS QUÍMICO	72
8.2 EXHALACIÓN DE RADÓN AL AIRE	75
8.3 EXHALACIÓN DE RADÓN EN EL AGUA	76
9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	79
9.1 DOSIS ESTIMADA DE ACUERDO AL MÉTODO DE LA NORMA TÉCNICA 112 DE LA UNIÓN EUROPEA	82
10. BIBLIOGRAFÍA	86

PARTE I

INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

La radiactividad natural es inherente a la vida sobre el planeta Tierra. Estamos expuestos a radiaciones procedentes de varias fuentes naturales, desde las que tienen origen en el espacio a las asociadas al sustrato sobre el que vivimos. Desde los orígenes de la Tierra y hasta hace aproximadamente un siglo, la única exposición procedía de estas fuentes naturales de radiación. A éstas han venido a sumarse, desde el descubrimiento de la radiactividad, otras surgidas de las aplicaciones de dicho descubrimiento y que denominamos “fuentes artificiales”. Actualmente, por tanto, el nivel de exposición causante de la dosis de radiación que recibe la población procede de un conjunto de fuentes, clasificadas por su origen en naturales y artificiales, que tienen distinta intensidad.

La exposición a las radiaciones ionizantes, cualquiera que sea su origen, puede causar efectos perjudiciales sobre la salud. Para dosis de radiación agudas y elevadas, los efectos son detectables clínicamente en las personas expuestas, poco tiempo después de la exposición. Estos efectos se denominan “deterministas” porque su aparición es segura cuando la dosis sobrepasa un nivel umbral, siendo la probabilidad de ocurrencia nula a dosis bajas. La severidad del daño aumenta con la dosis por encima del umbral, el cual varía para cada tipo de efecto. Para dosis bajas de radiación, también se considera la posibilidad de inducción de efectos, los cuales son detectables sólo estadísticamente, no pudiendo ser relacionados de una forma precisa con la dosis de radiación recibida. Estos efectos, por tanto, tienen cierto carácter aleatorio y pueden manifestarse tras un largo periodo tiempo transcurrido desde el momento de recibir la exposición. El cuerpo humano posee mecanismos de protección y defensa contra cualquier factor externo que sea potencialmente peligroso, incluida la radiactividad. Estos mecanismos hacen que los efectos perjudiciales sobre el organismo para bajas dosis de radiación sean muy poco frecuentes.



1.1 LA RADIATIVIDAD NATURAL

1.1.1 ORIGEN DE LA RADIATIVIDAD NATURAL

La radiación cósmica alcanza la superficie de la Tierra atravesando la atmósfera, procedente del sol y otras fuentes de energía de nuestra galaxia o incluso externas a ella. Esta radiación consiste en partículas cargadas de diferentes energías. Su intensidad aumenta con la latitud, al estar afectada por el campo magnético terrestre y, en mayor grado, con la altitud del lugar, al disminuir el efecto blindaje que ejerce la atmósfera. Esta variación con la altitud es significativa, duplicándose la dosis cada 1.500 m en los primeros kilómetros, lo que significa, por ejemplo, que los habitantes de ciudades como Teherán o Méjico reciben el doble de dosis por esta causa que los de Londres o París. Su principal vía de exposición es la irradiación externa, con una ínfima contribución a la exposición interna por la incorporación al organismo de radionucleidos (H^3 , Be^7 , C^{14} y Na^{22} , fundamentalmente) resultantes de la interacción de los rayos cósmicos con los componentes de la atmósfera.

La exposición, debida a las fuentes terrestres tanto en interiores como en exteriores, procede de los elementos radiactivos naturales presentes en los materiales de la corteza terrestre y su distribución en otros componentes de la biosfera. Dichos elementos son los llamados primordiales, como el K, y los componentes de series radiactivas naturales cuyos elementos, U y Th, existen en la tierra desde su formación dados sus muy largos periodos de semidesintegración. De entre las exposiciones debidas a las fuentes terrestres, la contribución a la irradiación interna por inhalación de Rn, gas noble radiactivo perteneciente a la serie del U, supone el 50% de toda la exposición media por fuentes naturales. La concentración de radón en interiores de edificios es significativamente más alta que al aire libre, donde puede dispersarse. Por este motivo ha de prestarse una especial atención a este elemento dentro de las radiaciones naturales, ya que dependiendo de las características geológicas locales, su concentración en el interior de los edificios puede variar significativamente.

El Rn es un gas noble radiactivo que se encuentra en las rocas. Este elemento está generado por la transformación del U, elemento químico presente en cantidades variables



en las rocas. Es el Rn un gas incoloro e inodoro que no resulta fácilmente reconocible y es frecuente detectarlo en las habitaciones de los edificios, donde este tiende a concentrarse. La desintegración del Ra da lugar a un átomo de Rn y a una partícula alfa (α) (Fig. 1): $U \rightarrow Th^{234} \rightarrow Pa^{234} \rightarrow U^{234} \rightarrow Th^{230} \rightarrow Ra \rightarrow Rn + \alpha$ (Fig. 2). El átomo de Rn, al ser este un gas, se mueve por las fisuras de las rocas, fisuras generalmente mineralizadas; a este proceso, que tiene lugar a nivel microscópico, se le denomina “emanación”. Cuando el Rn pasa de la superficie a la atmósfera tiene lugar el fenómeno macroscópico conocido como “exhalación”.

El Rn y sus descendientes radiogénicos se introducen en los pulmones a través de las vías respiratorias, fijándose aquí los isótopos de Po y Bi, generados por transformaciones sucesivas como consecuencia de emisión de radiación ionizante. Estos isótopos tienen períodos de semidesintegración que no exceden de unos minutos, produciéndose una irradiación continua de los tejidos pulmonares en un corto intervalo de tiempo.

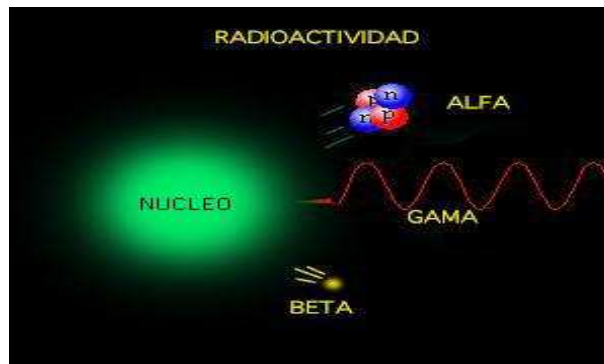


Fig. 1. La desintegración de las partículas del núcleo da como resultado una emisión de partículas alfa y beta y emisión de radiación gamma. (<http://web.educastur.princast.es>.)

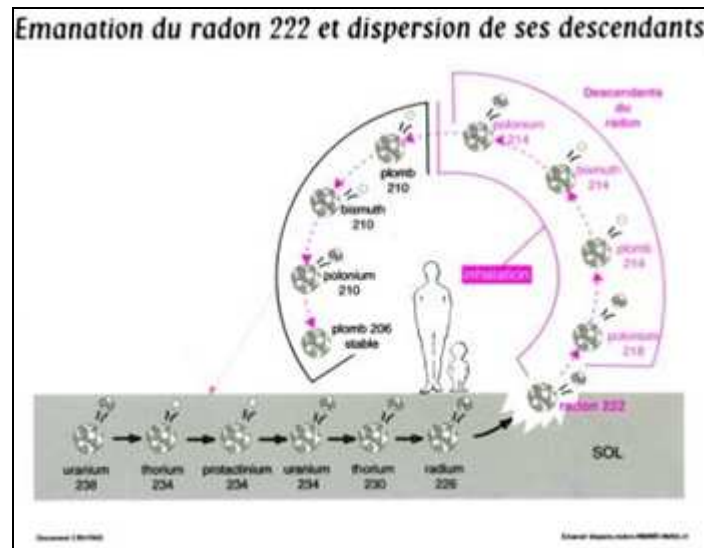


Fig. 2. La cadena de desintegración del Radio. (www.amcmh.org/).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) estima que 1 a 3 de cada 100 personas que, durante su vida, inhalen aire con altas concentraciones de Rn, corren riesgo de contraer cáncer de pulmón; este riesgo se ve incrementado considerablemente en el caso de fumadores, ya que existe una sinergia entre los dos factores.

Actualmente, las implicaciones ambientales derivadas de la presencia de Rn en sistemas geológicos constituyen una preocupación para los organismos oficiales de diversos países. Las mayores concentraciones de Rn observadas en distintos estudios pertenecían a zonas cuyo sustrato geológico estaba formado fundamentalmente por granitos. De entre todas las variedades de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que se encuentran en el planeta, los granitos, son los que normalmente incorpora mayores valores de U.

1.2 LA RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

Entre las posibles fuentes de radiactividad artificial contribuyentes a la dosis de radiación que recibe la población, se encuentran las exposiciones médicas, el ciclo del combustible nuclear, incluyendo las operaciones de centrales nucleares, las antiguas explosiones nucleares en atmósfera, causantes de contaminación a escala mundial y los



accidentes nucleares con consecuencias ambientales. Otras fuentes de uso industrial, limitan su posible exposición a los profesionales que las manejan, sin afectar a la población general, salvo pérdida de control o accidente. Con excepción de las exposiciones médicas, cuya contribución a la dosis promedio se estima en 0,4 mSv por año, el resto de fuentes artificiales tiene escasa contribución a la dosis promedio de la población (Fig. 3). A pesar de ello, la preocupación social es mucho mayor para este tipo de emisiones, menos contribuyentes a la exposición total.

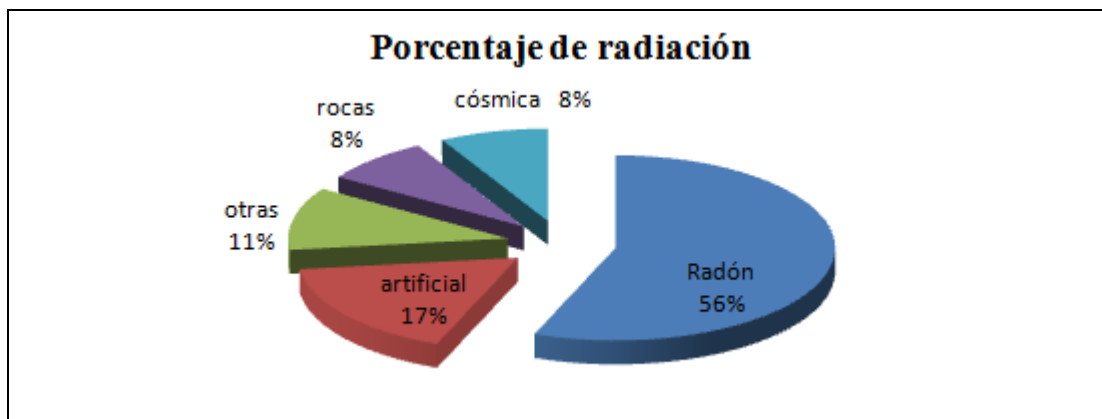


Fig. 3. Distribución de las radiaciones recibidas por el ser humano. (Fuente: Laboratorio de radiactividad natural de la Universidad de Coimbra).

1.3 MEDIDA DE LA RADIATIVIDAD NATURAL

El sievert (símbolo Sv) es una unidad derivada del SI que mide la dosis de radiación absorbida por la materia viva, corregida por los posibles efectos biológicos producidos. 1 Sv es equivalente a un joule por kilogramo ($J\ kg^{-1}$). Esta unidad da un valor numérico con el que se pueden cuantificar los efectos producidos por las radiaciones ionizantes. Su diferencia con el Gray (unidad de la dosis absorbida) es que esta unidad está corregida por el daño biológico que producen las radiaciones, mientras que el Gray mide la energía absorbida por un material.

El Becquerel es la unidad de medida de la radiactividad en el Sistema Internacional de Unidades, llamada así en homenaje a Antoine Henri Becquerel, su símbolo es *Bq* y corresponde a una desintegración por segundo. (definiciones de la International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU)).



Se cumple la equivalencia $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$ para las radiaciones electromagnéticas (Rayos X y gamma) y los electrones, pero para otras radiaciones debe utilizarse un factor corrector: 20 para la radiación alfa, de 1 a 20 para neutrones,...) (ICRU). Esta unidad es utilizada para medir diferentes magnitudes como la dosis equivalente, la dosis colectiva, la dosis ambiental o la dosis efectiva.

El Comité Científico de Naciones Unidas para los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR en sus siglas inglesas), es la entidad internacional más reconocida en relación con la evaluación de la contribución a las dosis de radiactividad que recibe la población debido a las diferentes fuentes de radiación existentes en el medio ambiente, cualquiera que sea su origen, y la estimación de los efectos atribuibles a la radiación ionizante. En apartados siguientes se contemplan las principales conclusiones de este comité.

De lejos, la radiactividad natural ha sido y es actualmente la mayor contribuyente a la dosis promedio de la población, alcanzando un valor de 2,4 mSv por año como media mundial y oscilando en un rango típico comprendido entre 1 y 10 mSv por año.

1.4 EFECTOS DE LA RADIACION

La radiación ionizante puede producir cambios a nivel atómico y molecular. En una célula viva, algunos de estos cambios, derivados del daño producido al ADN de su núcleo, pueden tener consecuencias a corto o a largo plazo. Si el daño inducido no es reparado adecuadamente puede afectar a las funciones celulares esenciales o a la división normal de la célula. El resultado será la muerte celular inmediata tras un pequeño número de divisiones, o bien una transformación celular con producción de células hijas modificadas. Estos resultados pueden dar lugar a distintos tipos de efectos: efectos tempranos, para altas dosis de radiación o efectos tardíos en el rango de dosis bajas. Se subraya de nuevo que los mecanismos de reparación y defensa del cuerpo humano hacen que la manifestación de efectos tardíos sea muy poco probable para las dosis pequeñas.

Se ha estimado un coeficiente nominal de probabilidad de efectos estocásticos “fatales”, para relacionar la probabilidad de aparición de un determinado cáncer mortal con



la unidad de dosis efectiva, con un valor de $5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$. Su interpretación es la existencia de una probabilidad de 5 en 100.000 de aparición de un cáncer mortal por cada mSv recibido. Si se pondera este coeficiente teniendo en cuenta la posible aparición adicional de cánceres no mortales, estimada en un 20 % del valor citado, y la probabilidad de inducción de efectos hereditarios, estimada en $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$, se obtiene un coeficiente nominal de probabilidad para todos los efectos estocásticos de $7,3 \cdot 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$. A título de comparación puede citarse que una actividad que suponga una probabilidad de muerte de 1 en 10.000 es considerada “muy segura”, considerándose “aceptables” las actividades con probabilidad de muerte de 1 en 1.000 para grupos que conocen el riesgo, saben protegerse y reciben un beneficio directo por realizar la actividad.

Los valores de las dosis agudas de radiación que son capaces de producir efectos deterministas (clínicamente detectables) se conocen con un grado razonable de precisión. Como esos efectos se producen con dosis relativamente elevadas, existen suficientes datos fiables de los cambios en ciertos parámetros fisiológicos tales como las alteraciones cromosómicas o hematológicas. No obstante, últimamente se ha puesto de manifiesto que no hay un conocimiento suficiente sobre los niveles umbrales de producción de estos efectos deterministas en los casos de irradiaciones crónicas que persisten en el tiempo.

1.5 LEGISLACIÓN

España es un país que carece de legislación específica que regule el uso de los materiales de construcción en función de su radiactividad natural. Sin embargo, la Unión Europea dispone de una serie de preceptos destinados a regular el uso de dichos materiales, dependiendo de su dosis de radiactividad. Esta serie de principios constituyen lo que se conoce actualmente como Norma 112 de principios de protección radiológica concerniente a la radiactividad natural de materiales de construcción (Radiological Protection Principles concernig the Natural Radioactivity of Building Materials).

A continuación resumiremos algunos de los puntos incluidos en dicha norma y que describen las ideas principales sobre la radiactividad natural en todos los materiales de construcción y sus efectos, así como las dosis mínimas recomendables en edificios ya



construidos y de nueva construcción y aplicables a países miembros de la Unión, entre los cuales se incluye España.

- 1) Todos los materiales de construcción contienen cantidades variables de nucleidos de radiactivos naturales. Los materiales derivados de rocas contienen cantidades radionucleidos naturales de las series del U y Th y del isótopo radiactivo del K.
- 2) La exposición a radiación de los materiales de construcción puede ser dividida en exposición interna y externa. La exposición externa es causada directamente por la radiación γ . La exposición interna es causada por inhalación de Rn. El Rn es parte de la serie de desintegración del U, el cual está presente en los materiales de construcción. En muchos casos, la mayor parte del Rn en el interior de las plantas superiores de los edificios proceden de los materiales de construcción.
- 3) Restringir el uso de ciertos materiales de construcción puede tener consecuencias económicas y sociales a nivel local y nacional. Dichas consecuencias, junto con los niveles nacionales de radiactividad natural de los materiales de construcción, deben ser asesoradas y consideradas estableciendo determinadas regulaciones.
- 4) El control en la radiactividad de los materiales de construcción puede estar basado en los siguientes criterios y principios radiológicos:
 - a) Los controles deben ser basados en criterios que son establecidos considerando las circunstancias nacionales. Dosis que superen 1mSv^{-1} deben ser aceptadas solo en casos muy excepcionales donde los materiales fueron usados localmente. Es recomendable que los controles estén basados en una dosis en un rango de $0,3 - 1\text{mSv}^{-1}$.
 - b) Nivel de exención. Los materiales de construcción deben estar exentos de todas las restricciones concernientes a su radiactividad si el máximo de radiación gamma responsable de la dosis anual efectiva de una persona tiene un valor de $0,3\text{mSv}$. Este es el máximo de radiación gamma que es recibida en exteriores.



c) Criterio de dosis:
$$I = \frac{C_{Ra}}{300 \text{ Bq/Kg}} + \frac{C_{Th}}{200 \text{ Bq/Kg}} + \frac{C_K}{3000 \text{ Bq/Kg}}$$

Donde C_{Ra} , C_{Th} , C_K representan la concentración de actividad de los elementos radiactivos en el material de construcción. Dicha concentración de actividad I no debe exceder los siguientes valores en función del criterio de dosis y de la manera en que el material es usado en la construcción (Tabla 1).

Criterio de dosis	0,3 mSv ⁻¹	1 mSv ⁻¹
Materiales usados en amplias cantidades como el hormigón.	$I \leq 0,5$	$I \leq 1$
Materiales superficiales y otros de uso restringido: tejas, losas.	$I \leq 2$	$I \leq 6$

Tabla 1. Límite de concentración de actividad en función del criterio de dosis y del uso del material. (Norma 112: *Radiological Protection Principles concernig the Natural Radioactivity of Building Materials*).

- 5) Normalmente, las medidas de la concentración de actividad son necesarias sólo en el caso donde hay una razón específica para sospechar que el criterio de dosis de los controles puede ser excedida. Los países miembros deben requerir, como mínimo, la medición de los tipos de materiales que son generalmente sospechosos.
- 6) Las medidas de actividad de concentración en materiales de construcción deben ser realizadas con equipamiento apropiado cuya calibración haya sido aprobada y su calidad asegurada mediante programas.
- 7) Algunos materiales de construcción naturales usados tradicionalmente contienen radionucleidos naturales donde la dosis anual de 1 mSv puede ser excedida. Algunos de estos materiales pueden haber sido usados durante décadas o siglos. En estos casos, el uso de estos materiales debe ser analizado y debe incluir costes financieros y sociales.



De entre todos los preceptos descritos en esta legislación, cabe destacar el texto relacionado con la importancia de las consecuencias a nivel económico y social si se restringe el uso de ciertos materiales que en la actualidad son ampliamente usados en España para la construcción, tanto de interiores como de las fachadas exteriores de los edificios, tanto oficiales como particulares. Es por esto que recalcamos la necesidad de una legislación que regule tanto el análisis de aquellos materiales generalmente empleados como las posteriores medidas a tomar en relación con la dosis de radiación provocada por cada tipo de material.

PARTE II

LAS ROCAS NATURALES



LAS ROCAS NATURALES

2.1 DEFINICIÓN

Recibe el nombre de roca natural toda aquella roca que pueda obtenerse en bloques o piezas de cierto tamaño que permitan su utilización o comercialización, y que sus propiedades constitutivas permanecen constantes en sus etapas de transformación.

Las rocas ornamentales son las piedras naturales que han sido seleccionadas para un fin concreto, y por tanto trabajadas, debastadas o cortadas en determinadas formas o tamaños, con superficies elaboradas mecánicamente. Actualmente se utilizan indistintamente los nombres de roca natural o roca ornamental para referirse a estos materiales nobles. Los tipos de rocas que han sido seleccionadas como muestras en este trabajo y que han sido utilizadas para los ensayos forman parte de este grupo.

2.2 NOMBRE CIENTÍFICO / NOMBRE COMERCIAL

Cada una de las diferentes variedades de rocas que podemos encontrar actualmente en el mercado posee un nombre comercial que la distingue de las otras variedades y que muchas veces es absolutamente diferente del nombre científico o petrológico utilizado para describir las características mineralógicas de la roca. En ocasiones se ha dado la situación de que una misma variedad de roca con características petrológicas idénticas recibe diferentes nombres comerciales. Una de las consecuencias que puede provocar esta situación es que se pueda nombrar erróneamente una variedad de roca y en el caso que tratamos en este trabajo, relacionado con la dosis de radiactividad que provoca la roca, esto puede tener consecuencias comerciales o sociales en un mercado que en algunos países supone una parte importante de la economía nacional. Un ejemplo de este caso, aunque sin consecuencias económicas o comerciales que se sepan ocurrió con el trabajo de *Tzortis et al.*, (2003), basado en estudiar las dosis de radiactividad de ciertos granitos empleados en la construcción. Dichos autores mencionaban una variedad de granito brasileño que excedía los niveles mínimos recomendables. Posteriormente, *Anjos et al* (2005), en un



estudio sobre diversas muestras brasileñas, demostró que la variedad de granito a la que se hacía referencia en el trabajo de *Tzortis et al (2003)* había sido descrita con un nombre comercial equivocado. Si bien este error no presentó consecuencia comercial alguna, es un claro ejemplo de la importancia a la hora de definir una variedad de roca natural según su nombre comercial sin tener en cuenta su nombre científico, que describa sus características petrológicas que la distinguen de las demás variedades de rocas.

2.3 TIPOS DE ROCAS

En el mercado actual podemos encontrar varios tipos de rocas que permiten su utilización o comercialización (Tabla 2). Estos se agrupan, según criterios comerciales, en:

- Granitos
- Marmoesl
- Pizarras
- Otros (areniscas, cuarcitas, alabastro, basalto)

Como ya hemos dicho en el apartado anterior, muchas veces no coincide la clasificación de mercado con el nombre científico.

2.4 EL SECTOR EN ESPAÑA Y PORTUGAL

2.4.1 ESPAÑA

Una característica destacable del sector de la piedra natural es su alto grado de concentración geográfica, ya que más del 80% de la producción mundial procede de diez países, entre los cuales se encuentran España y Portugal. España es el primer productor europeo de granito y el tercer productor mundial de rocas ornamentales en general, tras China e Italia. Es el primer productor mundial de pizarra de techar y el segundo productor mundial de mármol.



España es un país importante a nivel mundial dentro del sector de la Piedra Natural. No obstante, la aparición de nuevos productores (Brasil, India, China, etc.) y mercados (Singapur, Corea, Hong-Kong, etc.) cobra cada vez mayor importancia. Esto tiene especial importancia al tratarse de un sector, el de la Piedra Natural, cuyas exportaciones, según datos de las Cámaras de Comercio, siguen manteniendo su crecimiento y alcanzaron la cifra de 688,4 millones de euros en el periodo enero-agosto de 2007 (basado en el informe publicado en ROC Máquina mayo-junio 2008, p: 58 – 61). La pizarra en bruto fue el producto que más aumentó (22,2%, 5,7 millones de euros en total), seguido por el acabado como adoquines (17,6%, 4,6 millones). En el extremo opuesto, las exportaciones de mármol en bruto descendieron (-9,7%, 158,4 millones) y se dieron aumentos moderados en el resto de productos (granito en bruto 2,3%, 31,7 millones; producto elaborado 5,4%, 259,1 millones; pizarra elaborada 5,8%, 228,9 millones).

TIPO DE ROCA	DISTRIBUCIÓN	EJEMPLOS DE LOCALIZACIÓN
<i>Granitos</i>	Galicia Extremadura Madrid Castilla y León Castilla-La Mancha	Porriño Badajoz, Cáceres Villacastin Segovia y Ávila Toledo
<i>Mármol</i>	Almería Murcia Alicante	Macael Caravaca de la Cruz, Cehegín y Lorca Novelda
<i>Pizarras</i>	Segovia Orense León y Asturias Lugo Badajoz	Bernardos Carballeda, Barco de Valdeorras La Cabrera, el Bierzo, los Oscos Mondoñedo Villar del Rey
<i>Otras: Areniscas y Cuarcitas</i>	Castilla y León	Zamora Salamanca Burgos Palencia
<i>Otras: Alabastro</i>	Aragón	

Tabla 2. Distribucion y localización de rocas naturales en España. (ROC máquina mayo-junio 2008 p: 58 – 61).



2.4.1.1 Visión general del comercio exterior del sector

El sector español de la piedra natural tiene vocación exportadora. La balanza comercial tanto en términos de volumen como de valor monetario, ha sido positiva en todos los años desde el año 2000 hasta el año 2007.

Durante el ejercicio 2007, el sector de la Piedra Natural ha experimentado una aceleración en el mencionado proceso internacionalizador que venía protagonizando desde los inicios del presente siglo. Por primera vez, las exportaciones de piedra natural españolas han superado la barrera de los mil millones de euros, estableciéndose en 1.024,5 millones en 2007, lo que supone un incremento del 6,8% respecto al 2006. El Balance Comercial, pues, ha aumentado durante 2007, llegando hasta los 647,3 millones de euros, lo que supone un incremento del 5,3% respecto al ejercicio anterior. El valor de las exportaciones supera ampliamente el de las importaciones, llegando casi a triplicar el valor de las importaciones.

En el sector de la piedra natural observamos una tendencia creciente, lo que nos pone sobre la pista de un posible cambio de naturaleza del sector, desde un carácter ligeramente interindustrial hacia un sector intraindustrial. Esto es lo que está salvando la actual crisis en el sector.

2.4.1.2 Principales destinos de las exportaciones y orígenes de las importaciones

Atendiendo al destino de las exportaciones en términos de valor monetario, el sector español exporta el 68% del valor total exportado a los países de la Unión Europea, principalmente a Francia (27%), que es el principal país destinatario de las exportaciones; a Reino Unido y Alemania (13% y 10% respectivamente). Estados Unidos (14%), China (9%) y los Emiratos Árabes Unidos (4%), son los principales países importadores en valor no comunitarios.

En cuanto al valor de las importaciones, China es el país del que se importa el mayor valor de piedra, con un 25% del valor total, aunque la importación desde la Unión Europea es muy relevante, con un total de 28%. Medidas en volumen, las importaciones de la Unión Europea suponen la partida más importante (un 38% del total, en el que destacan las



importaciones desde Portugal con un 29%); China con un 21%, Turquía e India con un 11 y un 10% respectivamente.

2.4.1.3 Comercio exterior dependiendo de las CCAA origen y destino

La Comunidad Valenciana y Galicia son los grandes motores exportadores del sector, agrupando entre ellas un 76% del total del valor exportador y un 54% del importador. Como es previsible, las exportaciones se concentran en mayor medida que las importaciones, especialmente en aquellas zonas productoras.

La Comunidad Valenciana lidera tanto el valor de las exportaciones (41%), como el de las importaciones (28%), seguida por Galicia con un 35% y un 26% respectivamente.

Respecto al valor de las exportaciones, les siguen Castilla y León (8%), País Vasco, Cataluña, Andalucía y la región de Murcia. En cuanto a las importaciones, la distribución esta menos concentrada. Así además de Valencia y Galicia destacan Cataluña (11%), Andalucía (10%) y el País Vasco (9%).

Por volumen, el análisis no varía en exceso, excepto en el caso de las importaciones, en el cual Galicia se constituye como la comunidad que importa mayor volumen de piedra natural (39% del total), seguida por la Comunidad Valenciana (un 22%), Cataluña (un 11%), País Vasco y Andalucía (un 7% y un 8% respectivamente) (Instituto Tecnológico de la Construcción “comercio exterior del sector de la piedra natural en España” <http://www.aidico.es/>)

2.4.2 PORTUGAL

La cuota de producción de piedra natural asciende en este país a casi un 4% del Producto Nacional Bruto. Los expertos están trabajando en conceptos de marketing, ya que la piedra natural desempeña un importantísimo papel en Portugal.

Alrededor de 1 000 empresas producen en más de 500 canteras, con más de 10 000 empleados, una cifra anual próxima a los 2,6 millones de toneladas de bloques en bruto. A título de comparación: Italia produce alrededor de 10 millones y Alemania solo 0,5 millones de toneladas.



Hace tan sólo dos años, más del 40 por ciento de la producción portuguesa de piedra natural estaba destinada a la exportación: España, Francia, Inglaterra, Italia, Noruega, Suiza, EE.UU, Japón y Arabia Saudita eran los principales países importadores. Portugal ocupa el sexto lugar en el ranking mundial de países productores de piedra natural. Sin embargo, las exportaciones están descendiendo desde hace dos años.

Desde 1994, el sector ha crecido alrededor del nueve por ciento al año en Portugal, situándose en la cuota de consumo per cápita de casi un metro cuadrado por habitante, muy cerca del líder mundial, Italia. En Portugal todavía sigue produciéndose a un nivel económico como en ningún otro país de la Unión Europea.

La zona de explotación más conocida de piedra natural es la región de Alentejo con Estremoz, Borba y Vila Vicosa; aquí se produce aproximadamente el 75% de la piedra natural de Portugal. La zona situada entre Coimbra y Lisboa es la zona de explotación de piedra caliza más importante de Portugal, en la que se encuentran concentrados los centros de explotación entre Porto des Mos y Alcobaca así como alrededor de Pero Pinheiro. Las piedras calizas explotadas en esta zona son muy resistentes y particularmente aptas para ser pulidas. La mayoría de las piedras calizas portuguesas son de color amarillento, beige, gris o marfil, con un veteado casi siempre rojizo.

Los granitos portugueses pueden encontrarse en casi todos los colores del espectro de rocas duras, desde grises claros, pasando por amarillos y rojos, hasta grises muy oscuros. Los granitos suelen ser muy homogéneos y regulares. El tamaño de los cristales varía desde fino hasta grueso. En el Sur de Portugal, en la Sierra Monchique, aflora una sienita de atractivo color y estructura homogénea, que se comercializa también como “granito”.

PARTE III

ANTECEDENTES AL TRABAJO



ANTECEDENTES AL TRABAJO

El estudio de la radiactividad natural en materiales de construcción, en concreto en el caso de las rocas naturales, ha sido tema de escasos estudios y que por lo tanto presenta un corto historial en nuestro conocimiento. Esto se debe a que ha sido recientemente cuando se ha desarrollado el uso del granito como revestimiento interior en determinadas construcciones. No obstante, realizaremos un resumen de los trabajos realizados sobre este tema llevados a cabo sobre rocas naturales de diversos orígenes.

Higgy et al. (2000) realizaron un estudio con la intención de medir la radiactividad de algunos materiales de construcción egipcios usados en la construcción de paredes y suelos. Los materiales utilizados en la medición fueron cuatro tipos de ladrillos, tres tipos de tejas, dos tipos de cerámica y uno de mármol. Para realizar sus ensayos, todas las muestras fueron molidas y tamizadas hasta obtener un tamaño inferior a 1 mm y secadas a 100° C durante 24 horas.

Para realizar las mediciones de espectrometría gamma se tomaron 200 cm³ de cada muestra. Después de ser pesadas fueron almacenadas durante unas 4 semanas en recipientes de plástico impermeables al Rn hasta alcanzar el equilibrio entre la desintegración del Ra y el Th. Para el análisis de espectrometría α , una porción de las muestras en polvo fue calentada a 500° C. Se analizaron 5 gr. de cada ejemplo con un trazador de U para calcular la concentración química y disuelta usando ácidos (HNO₃, HF, HCl).

El trabajo de *Tzortis et al. (2003)* consistía en estudiar la medida de la radiación γ en rocas naturales comercializadas como recubrimiento, en concreto de granitos. Para llevar a cabo dichas medidas, utilizaron un espectrómetro de rayos γ de alta sensibilidad sobre un total de 28 muestras pertenecientes a diferentes tipos de granitos comerciales (Tabla 3), de las cuales diversas muestras fueron erróneamente situadas en cuanto a sus lugares de procedencia. La actividad resultante estaría en función de la proporción de los materiales estudiados que son usados en la construcción de la edificación. Este estudio revela la



radiación obtenida para una utilización de los materiales en la edificación de un 100%, 50% y 25%.

Los estudios llegaron a la conclusión de que la dosis total efectiva recibida por personas en el interior de un edificio fue entre 0,02 y 2,97 mSv⁻¹ para una utilización de los materiales de un 50%. Aplicando este criterio a la recomendación de la UE, obtuvieron que la mayoría de las muestras reunían las condiciones de la dosis límite de 0,3 mSv⁻¹ y sólo una superaba este límite permitido de 1 mSv⁻¹. Para las medidas de rayos γ , 13 muestras aparecen con concentraciones de Th superiores a 100 BqKg⁻¹, mientras solo 6 muestras presentaban concentraciones de U que sobrepasaban dicho límite. La dosis total absorbida en el aire calculada para las concentraciones de los radionucleidos de las series del Th, U y K para un contenido en el recubrimiento del 100% del material estudiado tiene un rango entre 7 y 1209 nGy h⁻¹, 23 de las muestras presentaban dosis entre 100 a 400 nGy h⁻¹, 2 tenían dosis por debajo del límite mínimo de 100 nGy h⁻¹ y sólo 3 presentaban valores que superaban el límite máximo de 400 nGy h⁻¹.

Nº muestra	Nombre comercial	País de origen	Concentración + - error total (Bq Kg ⁻¹)		
			Th	U	K
1	Blanco perla	Italia	37 ± 2	57 ± 2	1228 ± 48
2	Santa Cecilia	Brasil	85 ± 2	45 ± 1	1435 ± 55
3	Blue Paradise	Brasil	92 ± 2	15 ± 1	1246 ± 48
4	Blue Pearl	Bélgica	77 ± 2	68 ± 2	1129 ± 44
5	Verde Brasil	Brasil	121 ± 3	5 ± 1	1200 ± 47
6	Upatuba	África	21 ± 1	17 ± 1	1581 ± 61
7	Verde Eucaliptos	Brasil	26 ± 1	45 ± 1	1522 ± 59
8	Rojo África	África	113 ± 2	57 ± 1	1360 ± 38
9	Tropical Japorana	Brasil	17 ± 1	13 ± 1	1048 ± 30
10	Astudo	África	32 ± 1	18 ± 1	254 ± 11



11	Marrón Báltico	Brasil	136 ± 4	102 ± 3	1520 ± 58
12	Rojo Balmoral	Holanda	490 ± 13	162 ± 5	1540 ± 60
13	Rosa Porriño	Italia	172 ± 5	103 ± 3	1424 ± 55
14	Giallo Penere	Brasil	82 ± 2	31 ± 1	1230 ± 47
15	Nero África	África	0 ± 1	1 ± 1	50 ± 3
16	Rosa Beta	Italia	69 ± 2	40 ± 1	1124 ± 44
17	Blanco Arabesco	N/A	146 ± 4	108 ± 3	1359 ± 52
18	Saint Tropez	Brasil	40 ± 1	8 ± 1	1021 ± 40
19	Kinawa	Brasil	101 ± 3	58 ± 2	1168 ± 45
20	Multi-color	N/A	82 ± 2	10 ± 1	1486 ± 57
21	Capao Bonito	Brasil	190 ± 5	84 ± 2	1313 ± 51
22	New Imperial	N/A	273 ± 7	285 ± 8	1273 ± 49
23	Juparana	Brasil	265 ± 7	35 ± 1	1446 ± 56
24	Grans Paradiso	N/A	51 ± 1	29 ± 1	1013 ± 39
25	Café Brown	Brasil	906 ± 24	588 ± 16	1606 ± 62
26	Rosa Ghiandone	Italia	89 ± 3	57 ± 2	1047 ± 41
27	Jacaranda	Brasil	147 ± 4	68 ± 2	1031 ± 40
28	Colibrí	Brasil	155 ± 4	53 ± 1	1365 ± 53

Tabla 3. Concentración de actividad de Th, U y K en los granitos usados en el estudio de Tzortis et al (2003). Se puede observar en la tabla, cómo varios orígenes de las rocas mencionadas son erróneos, lo cual pudo provocar errores y fue discutido en trabajos posteriores. Hay que tener en cuenta que alguna de estas rocas se ubicaban en Brasil, siendo este el sexto país exportador del mundo de granito ornamental.



Una de las principales conclusiones de su trabajo, además de los resultados anteriormente descritos, fue que la utilización de un espectrómetro de rayos gamma de alta resolución es una herramienta sensible idónea para estudiar la radiactividad natural y determinar las concentraciones elementales y las tasas de radiación en varios tipos de rocas. Muchos de los granitos estudiados en su trabajo revelaban altos valores de actividad y concentraciones de Th, U y K, los cuales contribuyen a aumentar la dosis de radiación en el aire en el interior de los edificios.

Anjos et al (2005) presentan un estudio bastante completo sobre una selección de muestras brasileñas y abre el camino al estudio de la protección radiológica cuando las rocas graníticas son usadas como baldosas o revestimientos interiores. El estudio realizado por los citados autores parte del principio de que las concentraciones de Th, U, y K de rocas graníticas están íntimamente relacionadas con su composición mineral y sus características petrológicas generales (Whitfield et al; 1959, Rogers and Ragland, 1961; Doverton and Prenskey, 1992), usando un detector NaI o espectrómetro de rayos gamma para determinar la concentración de radionucleidos naturales sobre las muestras seleccionadas. Evaluaron la tasa de dosis anual efectiva y la concentración de actividad γ para compararlas con los límites propuestos por el Comité Científico para los Efectos de la Radiación Atómica de las Naciones Unidas. Posteriormente, la correlación entre Th, U y K sería comparada con las características petrológicas de granitos comerciales.

En sus resultados observaron una correlación positiva entre la concentración de Th y la concentración de K. Esto es más evidente para valores altos de la concentración de K. Si el K es considerado un índice de evolución o diferenciación progresiva en rocas graníticas, entonces el Th tenderá a incrementar más rápido y con una diferenciación más regular que el U. Encontraron repetidamente una correlación distinta entre la concentración de U y la de K. El U y el Th se encuentran generalmente enriquecidos en las rocas félsicas más jóvenes. La mayoría de la radiactividad se encuentra en granitos y pegmatitas asociadas. El alto nivel de radiactividad de las pegmatitas es atribuido a la presencia de los minerales accesorios radiactivos Thorianita, Uranofana y Allanita.



Las conclusiones principales del trabajo de los autores mencionados fue que los granitos brasileños estudiados no contienen minerales que puedan producir altos niveles de radiación cuando son usados como recubrimiento.

El – Hussein (2005) publica el primer estudio sobre la radiación natural cuyas medidas se realizan en habitaciones reales de edificios de viviendas. Este trabajo también es el primero que se basa en la concentración de Rn en las habitaciones interiores y de cómo la concentración de sus productos de desintegración es de 2 a 10 veces superior en el aire del interior de los edificios que en atmósfera libre. Se pretendía demostrar con esto que la alta concentración de estos radionucleidos en el aire del interior de los edificios, junto con largos períodos de exposición en estas habitaciones, hacen que los productos de desintegración del Rn sean un potencial riesgo para la salud.

Para la determinación de la concentración de gas Rn en el aire se usó un monitor de gas Rn idéntico a uno empleado y calibrado por Porstendörfer en 1980. La concentración de actividad de Ra, Th, y K fue determinada como en los casos anteriores por un detector NaI para modelos de espacio de 3x3x3 m.

Se observó que el decrecimiento de la fracción libre de Rn con el incremento de la concentración de partículas de aerosol era claro en la mayoría de las habitaciones.

El valor de la concentración de actividad para el gas Rn fue de $110 \pm 20 \text{ Bq m}^{-3}$.

Para evaluar la dosis total equivalente para una persona adulta, se asumió un tiempo de unas 7000 horas al año en interiores (*UNSCEAR (1982)*). Para las partículas libres de ^{218}Po y ^{214}Pb la dosis total equivalente para los pulmones fue de $133 \mu\text{Sv}$, lo cual corresponde a una dosis efectiva de menos de 20 mSv, que es considerablemente menor que la dosis estimada para los descendientes radiogénicos del Rn según (*UNSCEAR (1982)*). La actividad del Ra varió entre 21 y 80 Bq Kg^{-1} y la concentración del Th entre 17 y 45 Bq Kg^{-1} . En todos los ejemplos la concentración de Ra fue más alta que la del Th, además, se encontraron ejemplos libres del Th mínimo detectable por el espectrómetro. La concentración de actividad de K excedía notablemente las del Ra y Th, y fueron los datos más altos medidos en los ejemplos de la investigación. De acuerdo con las actividades



medidas de Ra, Th, y K, el valor medio calculado de la radiación equivalente fue de 113 Bq Kg⁻¹, el cual es menor que el máximo valor permitido de 370 Bq Kg⁻¹ (OECD, 1979).

Paulidou et al (2006) presentan un trabajo de 16 granitos, entre los cuales aparecen varios de procedencia española (Tabla 4).

Nombre del granito	U	Ra	Th	K
Salvatierra	115 ± 9	118 ± 2	77 ± 2	1320 ± 33
Rosa Porriño	61 ± 5	59 ± 1	109 ± 2	1420 ± 36
Blanco Real	96 ± 5	117 ± 1	95 ± 1	1233 ± 30
Topacio	32 ± 5	29 ± 1	44 ± 1	1327 ± 33
Yellow Cecilia	< MDA	19 ± 1	30 ± 1	1020 ± 26
Blanco Crystal	163 ± 9	163 ± 2	91 ± 2	1190 ± 30
Napoleón	< MDA	11 ± 2	46 ± 1	1200 ± 30
Balmoral	174 ± 7	170 ± 1	354 ± 3	1592 ± 39
African Red	98 ± 5	80 ± 1	121 ± 1	1421 ± 32
Multicolor	< MDA	11 ± 1	84 ± 2	926 ± 23
Marrón Báltico	64 ± 4	60 ± 1	57 ± 1	1350 ± 34
Gris Perla	67 ± 3	70 ± 1	43 ± 1	1340 ± 34
Esmeralda	50 ± 4	55 ± 1	63 ± 1	1053 ± 24
Marina Pearl	29 ± 3	35 ± 1	37 ± 1	894 ± 22
Zimbabwe	19 ± 4	20 ± 1	32 ± 1	332 ± 14
African Nero	< MDA	1,6 ± 0,3	< MDA	49 ± 4

Tabla 4. Concentración de actividad de U, Ra, Th, y K (Bq Kg⁻¹) para los granitos estudiados en (Paulidou et al (2006)). MDA = Actividad mínima detectable.



Se midió la radiactividad natural de las 16 muestras de granito mediante un espectrómetro de rayos gamma. La actividad de U, Ra, Th, y K fue medida y comparada con otros materiales de construcción, así como con otros tipos de granitos usados en todo el mundo. Además de esto, correlacionaron el relativamente alto nivel de radiactividad natural observada en algunos granitos con sus constituyentes minerales radiactivos y su composición química.

En los resultados que obtuvieron, las muestras de Blanco Cristal, Blanco Real, Rosa Porriño, African Red y Balmoral mostraron unos niveles de actividad que superaban el doble del valor normal, con el último ejemplo presentando una alta concentración excepcional de 354 Bq Kg^{-1} .

Para evaluar el impacto radiológico de granitos usados como materiales de construcción, usaron como modelo de casa un paralelepípedo rectangular de $3 \times 3 \times 3 \text{ m}$ sin puertas ni ventanas (UNSCEAR, 1993) y consideraron la dosis anual efectiva límite de 1 mSv . Concluyeron que la dosis absorbida por la gente en viviendas fabricadas con los granitos examinados sería mas alta que la dosis absorbida en viviendas fabricadas de materiales que no tuvieran en su composición el granito como material principal, excepto para el caso de los granitos Zimbabwe y African Nero. Estos dos tipos de granitos se desvían de la composición granítica teniendo una composición diorítica y cuarzogabroica respectivamente.

En sus resultados se observó que la dosis anual efectiva excedía del límite de 1 mSv para 6 ejemplos: Rosa Porriño ($1,4 \text{ mSv}$), Salvatierra ($1,4 \text{ mSv}$), Blanco Real ($1,4 \text{ mSv}$), African Red ($1,5 \text{ mSv}$), Blanco Cristal ($1,6 \text{ mSv}$) y Balmoral ($3,2 \text{ mSv}$). La muestra de Balmoral presenta la concentración de actividad más alta de todos los radionucleidos medidos (Tabla 5). La actividad del U y Ra fueron similares a las del Blanco Cristal y la del K era un 25% más alta. El alto nivel de radiactividad natural del granito Balmoral es atribuido al contenido de monazita. Este tipo de muestra contenía además otros minerales ricos en potasio (feldespato potásico, biotita y moscovita) al igual que zircón, apatito y fluorita, que podrían contener nucleidos radiactivos en su composición química.



Nombre	Dosis absorbida, D_a (nGyh⁻¹)	Dosis anual efectiva, H_E (mSv)	Actividad, AI
Salvatierra	157	1,4	0,89
Rosa Porriño	153,9	1,4	0,87
Blanco Real	164,2	1,4	0,94
Topacio	95,7	0,8	0,52
Yellow Cecilia	69,7	0,6	0,38
Blanco Crystal	181,1	1,6	1,04
Napoleón	83,4	0,7	0,46
Balmoral	364,8	3,2	2,15
African Red	171,1	1,5	0,98
Multicolor	95,7	0,8	0,55
Marrón Báltico	119,1	1	0,66
Gris Perla	114,5	1	0,63
Esmeralda	108,2	1	0,61
Marina Pearl	76,2	0,7	0,42
Zimbabwe	42,9	0,4	0,25
African Nero	2,8	0	0,01

Tabla 5. Dosis absorbida, D_a (nGyh⁻¹), dosis anual efectiva, H_E (mSv) y actividad AI para los ejemplos de granitos examinados en Paulidou et al (2006).

Después de analizar los 16 tipos distintos de granitos, concluyeron que la correspondiente dosis absorbida de todos los radionucleidos analizados excedía significativamente el valor medio de 51 nGy h⁻¹ de estos radionucleidos en la corteza terrestre. La dosis anual efectiva basada en un modelo de habitación estándar excedía el límite de 1mSv y⁻¹ para algunos tipos de granitos, en particular para el tipo Balmoral. No



obstante, hay que tener en cuenta que los granitos citados se usan normalmente en pequeñas cantidades en la construcción de casas, lo cual no induce un nivel de actividad que exceda la dosis límite de 1mSv y^{-1} . El alto nivel de radiactividad de los granitos del estudio estaba conectado con la presencia de minerales ricos en potasio y accesorios como el apatito y el hematites (Tabla 6) los cuales se encuentran con frecuencia en rocas graníticas.

Nombre	Minerales accesorios potencialmente radiactivos	H_E (mSv)
Salvatierra	Tit, Zr, All	1,4
Rosa Porriño	Zr, All	1,4
Blanco Real	Zr, Ap, Mz	1,4
Topacio	Zr, Hem, Ru	0,8
Yellow Cecilia	Zr	0,6
Blanco Crystal	Tit, Zr, Mz	1,6
Napoleón	Zr	0,7
Balmoral	Zr, Ap, Fl, Mz	3,2
African Red	Zr	1,5
Multicolor	Tit, Zr, Ap, Py, Hem	0,8
Marrón Báltico	Zr, Ap, Py, Hem, Ilm	1
Gris Perla	Tit, Zr, Ap, All	1
Esmeralda	Ap, Py, Hem	1
Marina Pearl	Zr, Ap, Al, Py, Ilm	0,7
Zimbabwe	Py, Hem	0,4
African Nero	-----	0

Tabla 6. Minerales accesorios potencialmente radiactivos en los granitos examinados, y dosis anual efectiva H_E (mSv) (Paulidou et al (2006)).

Tit = titanita, Zr = zircón, Ap = Apatito, Fl = fluorita, All = allanita, Mz = monazita, Py = pirita, Hem = hematites, Ru = rutilo, Ilm = ilmenita.



Los dos últimos estudios realizados sobre la radiactividad natural corresponden a sendas mediciones en rocas frescas, o lo que es lo mismo, en rocas que no han sido sometidas a ningún proceso para su posterior comercialización. Uno de estos estudios fue una medida de radionucleidos en rocas del Valle de Cervo en Piedmont (Italia) realizado por *Sesana et al (2006)*. Para dicho trabajo, monitorizaron la radiación gamma en el pluton del Valle del Cervo para determinar el contenido de U y Th en los principales tipos de roca a lo largo de un complejo granítico, un complejo sienítico y un complejo monzonítico. Todas las muestras eran frescas y no presentaban marcas de fracturas rellenadas con minerales de U. Encontraron que la actividad del U variaba de 346 a 764 Bq / Kg y la del Th variaba de 202 a 478 Bq / Kg. Para todas las rocas analizadas, la actividad del U resultó ser mucho más alta que la del Th. El valor más bajo de concentración de radiactividad se encontró en rocas del complejo granítico y las rocas más activas resultaron ser las sienitas.

El último trabajo realizado en esta revisión es de *Lu y Zhang (2007)*, que publicaron un estudio de la radiactividad natural en rocas del parque natural “Montañas Cuihua” en China. Estos autores midieron las concentraciones de radionucleidos naturales de Ra, Th, y K mediante un detector NaI. El valor de la actividad equivalente de todas las muestras de roca resultó estar por debajo del límite de 370 Bq Kg⁻¹.

PARTE IV

MEDICIÓN DE RADÓN



MEDICIÓN DE RADÓN

El Rn es el único gas radiactivo emisor de partículas α . Tiene tres isótopos naturales: ^{222}Rn , ^{220}Rn y ^{219}Rn . Cuando el Rn se desintegra produce los llamados “descendientes del Rn”. La detección y medición del Rn puede ser realizada directamente del propio Rn o indirectamente del Rn y/o sus descendientes. Como hemos dicho anteriormente, tanto el Rn como sus productos se desintegran emitiendo partículas α . ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb y ^{210}Bi son también emisores de partículas β y rayos γ acompañan su emisión β . De acuerdo con esto, la detección y medición del Rn puede ser realizada mediante análisis de partículas α y β o detección de radiación γ . La comprensión de las técnicas de detección y medición requiere de un conocimiento básico de la interacción de estas radiaciones con la materia.

4.1 MEDICIÓN DE RADÓN EN EL LABORATORIO

En la mayoría de los casos en los que se realizan mediciones de Rn, éstas tienen como objetivo analizar la posibilidad de aparición de diferentes tipos de cáncer por exposición al Rn. En otras ocasiones, las mediciones de Rn son realizadas para diferentes aplicaciones, entre las cuales se encuentran los estudios geotermales, prospección de minerales o predicción de erupciones volcánicas y terremotos.

En la mayoría de los casos, la radiación α y γ son los fenómenos detectables, independientemente de su simultaneidad. Para algunos de los descendientes, la radiación β también puede ser considerada. Alguna de las siguientes técnicas puede ser usada para la detección:

- Emulsión nuclear.
- Absorción.
- Escintilación sólida.
- Escintilación líquida.
- Espectrometría gamma.
- Monitorización beta.
- Detectores de restos nucleares sólidos.
- Electroscopio.
- Cámara de ionización.
- Detectores de barrido superficial.



- Fosforescencia termoluminiscente.

Prácticamente todas las técnicas que son usadas para la medición en suelo pueden ser usadas en el laboratorio. En el laboratorio dichos métodos se inspiran básicamente en las técnicas generales para la determinación y la estimación de radiactividad. La principal característica es la adaptación de estas técnicas al estado natural gaseoso del Rn. En el caso de este trabajo, las técnicas utilizadas son:

- La cuantificación por escintilación puede ser empleada para los niveles de Rn en la fase líquida, una vez haya sido extraído. Un buen ejemplo de la extracción de Rn es su determinación en el agua subterránea. El Rn es fácilmente soluble en agua y por este motivo puede ser transportado largas distancias.
- Las cámaras de ionización son las técnicas de medición de radiación más aplicadas a la determinación de Rn en muestras de diferentes atmosferas. Estas técnicas han sido extensamente descritas en libros de tecnología nuclear.

4.2 NIVELES DEL RADÓN O SUS DESCENDIENTES

El Rn tiene una serie de desintegración natural (derivada del U) donde el átomo de Rn es transformado en varios descendientes.

En los interiores de los edificios, suele haber ventilación normal, lo que significa que cierta cantidad de aire es reemplazado; esto provoca que los átomos de las series de desintegración tengan alguna posibilidad de abandonar el aire del interior. El átomo de Rn es el de mayor duración de vida radiactiva en la serie de desintegración que sigue inmediatamente al Ra. Los métodos de medición del Rn pueden ser separados en tres clases principales:

1. Mediciones de gas Rn
2. Mediciones de descendientes del Rn.
3. Mediciones de gas Rn y descendientes del Rn.



4.3 CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN INTERIORES DEBIDA A LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Uno de los orígenes del Rn en el interior de los edificios son los materiales de construcción. Todos los materiales contienen U y son, en consecuencia, potenciales emisores de Rn. Por otra parte, algunos materiales tienen concentraciones de U y Ra más altas. Esto es válido para materiales naturales y artificiales. Los típicos materiales naturales por contenido de Rn son los granitos; pero siempre es posible encontrar abundancia de uranio en rocas de diferentes tipos, localmente usadas como materiales de construcción. Por ejemplo, algunas arcillas usadas como material de construcción pueden tener una alta cantidad de U.

La medición de rayos γ en paredes es una manera fácil de localizar o identificar éstas como potenciales emisores de Rn en una casa. La ventana de energía del detector de rayos γ debe ser entre 50 keV y 3 MeV. Si la intensidad de radiación γ excede de $0,25 \mu\text{Sv h}^{-1}$ para una pared, ésta es una importante fuente de Rn.

De todas formas, esto no significa que la concentración de Rn en el aire del interior sea significativa, porque el aire reemplazado tiene una gran influencia en la concentración. Como algunos materiales pueden estar presentes sólo como accesorios, la masa total es muy pequeña para constituir una fuente efectiva de Rn.

Si un material rico en U es molido y usado como aislamiento en paredes y suelos, la intensidad de radiación γ del material ha de ser muy baja para no ser localizada por un detector de rayos γ .

4.4 VARIACIONES DE PERIODO CORTO EN LOS NIVELES DE RADÓN

Como el Rn es un gas, la ventilación en una construcción es un factor importante, afectando al nivel de Rn en los interiores de los edificios. En casas con escasa ventilación, las condiciones meteorológicas exteriores hacen que el grado de ventilación del interior sea



cambiante. Una presión negativa o un gradiente de presión pueden existir en alguna parte de la casa. Hay una conexión entre la velocidad del aire exterior, grado de reemplazamiento y el nivel de Rn interior. Cuando la velocidad del viento es muy baja, significa una reducida cantidad de aire reemplazado y un incremento del nivel de este elemento.

El alto nivel de Rn también depende del comportamiento de la gente en el interior del edificio: tiempo en que las puertas son abiertas o cerradas, número de veces que se abren las ventanas.... Los sistemas de combustión necesitan aire fresco, lo que normalmente se traduce en un descenso de la presión del aire en la casa. Las variaciones de corto periodo durante un día pueden ser extremas; Los movimientos convectivos de aire, la principal razón para estas variaciones.

4.5 VARIACIONES ESTACIONALES EN LOS NIVELES DE RADÓN EN INTERIORES

Pueden existir variaciones estacionales de los niveles de Rn en el interior de los edificios, especialmente en casas con una débil ventilación. En la época de verano, cuando la temperatura del exterior es alta o más alta que la temperatura del interior de la casa, los movimientos convectivos del aire interior son inapreciables. Si la temperatura es unos 10 °C más alta que en el interior, las fuerzas convectivas actúan y hay un pequeño descenso de presión en el interior. Si los materiales de construcción o el agua de la casa son los orígenes del Rn, el descenso de presión es una ventaja. La exhalación de Rn del interior de los materiales de construcción incrementa en la época de verano, cuando la temperatura general del edificio es más alta que en épocas invernales (*Stranden et al., 1984*).

Referente a los productos del Rn, la humedad relativa de los interiores contribuye a la densidad de aerosol y eleva los productos del Rn en el aire interior. Los cambios de humedad de una estación a otra modifican la concentración de Rn.

La conclusión es que las variaciones estacionales de los niveles de Rn en los interiores de los edificios dependen de varios parámetros:



- Tipo de casa.
- Origen del radón.
- Costumbres de los habitantes del edificio.
- Sistema de ventilación.
- Calefacción de la casa.
- Clima exterior.

4.6 CONCLUSIONES PRINCIPALES DE LA MEDICIÓN DE RADÓN

La fuente o el origen del Rn supone la característica básica mas importante a la hora de definir los procesos de mitigación de los niveles de Rn en los interiores. El conocimiento acumulado del comportamiento del gas puede dar una indicación de cómo reducir los niveles más altos de Rn.

Los altos niveles de Rn de los materiales de construcción y del suministro de agua de la casa pueden ser reducidos simplemente con un aumento del grado de ventilación. Al reducir los altos niveles de Rn por el uso de un grado de ventilación incrementado, el descenso de presión del interior debe de ser muy pequeño. Los métodos de mitigación del Rn son muy parecidos a los métodos usados para reducir otros gases acumulados en el interior de edificios.

Otra característica son los diferentes niveles de Rn en las diferentes habitaciones de una casa lo que significa que no es suficiente el uso de un único detector para la estimación de los niveles de Rn en toda una casa.

La variación estacional del nivel de Rn en interiores puede provocar que éste presente un factor dos veces más alto durante una estación en comparación con otra época del año. Esto implica que el principal valor del nivel de Rn medido en una casa tiene una incertidumbre no causada por la técnica de medición del elemento pero sí por la naturaleza del mismo.

Es evidente que el Rn tiene su “propia vida” en cada casa. Debido a esto, no es posible generalizar y decir que es suficiente medir el nivel de Rn en una casa y creer que el resto de las casas similares tienen el mismo nivel de dicho elemento.

PARTE V

OBJETIVOS



OBJETIVOS

El trabajo realizado ha tenido dos objetivos principales:

- 1) Realizar un estudio de la radiactividad natural en rocas de uso común en España y Portugal. Se pretende con esto obtener y analizar la dosis efectiva de radiación que pueden provocar estas rocas sobre las personas en diversas situaciones, para determinar su correcto uso como materiales de construcción.
- 2) Establecer una relación entre la radiactividad natural y la mineralogía de la roca, principio que ya fue descrito anteriormente. La finalidad de este análisis es determinar qué elementos de la composición mineral de la roca influyen en el nivel de radiación que es emitida por dicha roca.

Estos objetivos, junto con los análisis y ensayos realizados para obtener los posteriores resultados, parten de unos conocimientos escasos en un campo poco estudiado, del que existe poca o ninguna difusión en nuestro país, al menos en nuestro conocimiento.

PARTE VI

LAS ROCAS DEL ESTUDIO



LAS ROCAS DEL ESTUDIO

Para la realización de este trabajo hemos utilizado un grupo de rocas comercializadas ampliamente como material de construcción en España y Portugal. Dicho grupo está formado por cinco variedades de granito, dos de los cuales son de origen Portugués y tres de origen español, y dos variedades de serpentinitas, ambas procedentes de España.

LOS GRANITOS

Dentro del ámbito de la piedra natural entendemos por “granito” cualquier roca constituida por agregados cristalinos de varios minerales, explotable en grandes bloques coherentes y homogéneos, y que pueden ser cortados, desbastados y/o pulidos. En esta definición, el sector de la piedra natural incluye no sólo granitos propiamente dichos, sino otras rocas ígneas plutónicas como granodioritas, tonalitas, sienitas, gabros, etc..... incluso algunas rocas metamórficas como gneises, anfibolitas y migmatitas.

La clasificación de los granitos y rocas relacionadas, se hace en función de la composición química y de la composición modal (% en volumen) de los minerales esenciales que las constituyen. Estos minerales pueden ser, por su composición y su color:

- **Minerales félsicos** o de colores claros, grupo al que pertenecen el cuarzo, feldespato alcalino (que incluye feldespato potásico en cualquiera de sus formas –ortosa, microclina, sanidina, anortoclasa- así como la plagioclasa albitica), plagioclasa y feldespatoideos, tales como leucita, nefelina, sodalita o noseana.
- **Minerales máficos** (con magnesio y hierro) o minerales oscuros, que incluyen el olivino, todos los piroxenos, anfíboles y las micas, así como otros normalmente accesorios.

Siendo el uso como roca ornamental uno de los mas importantes que se le da a este tipo de rocas, su color adquiere una especial importancia, por encima incluso de las propiedades físico – mecánicas de la roca. Uno de los minerales que puede adquirir más



variación cromática es el feldespato potásico, y en menor medida la plagioclasa. Los granitos y otras rocas plutónicas relacionadas ricas en feldespatos, como las sienitas, pueden presentar colores muy variados: blancos, cremas, rosas, rojos o marrones, o distintos tonos verdosos, azulados o grises.

De todas estas características dependerán las distintas aplicaciones del granito, que son muy numerosas, empleándose para sillerías y mampostería, pavimentos con losas y adoquines, chapados o plaqueados de fachadas e interiores decorativos, bordillos y molduras, encimeras, pilas, etc.

Las diferentes variedades de granito presentes en nuestro estudio son: *Gris Los Santos*, *Rojo Sayago*, *Azul Platino* de origen español y los granitos de *Pedras Salgadas* “*Cinzeno Claro*” y *Aguiar da Beira* “*Branco Micaela*”, ambos procedentes de Portugal. La localización de las diferentes variedades se muestran en el mapa de la figura 4.

LAS SERPENTINITAS

Las serpentinitas son rocas de extendida utilización como roca ornamental debido a su amplia y atractiva gama de texturas y estructuras. Sin embargo, el desconocimiento de su composición, tanto química como mineralógica por parte de las casas comerciales, y muchas veces de los arquitectos, hace que en ocasiones su uso no sea correcto. Son rocas procedentes de la alteración de minerales anhidros que formaban parte de una roca ultramáfica preexistente. Olivino, piroxenos, otros silicatos magnésicos y espinelas que se transforman por hidratación en distintos minerales del grupo de la serpentina, dando lugar a rocas parcial o totalmente serpentinizadas.

Las serpentinitas son muy utilizadas como roca ornamental, pero actualmente no tienen una normativa propia dentro del ámbito europeo. Debido a que muchas de estas rocas que se explotan para su uso ornamental tienen un alto grado de carbonatación, las serpentinitas se engloban en las fichas técnicas de los mármoles. Sin embargo, su diferente historia petrogenética hace que a veces presenten un contenido muy elevado de serpentina y apenas nada de carbonato.



Las serpentinitas han sido tradicionalmente usadas en monumentos, como la catedral de Genova o la catedral de Florencia y hoy en día son muy populares en las construcciones civiles. Las serpentinitas mas usadas son aquellas procedentes de la India (Rajasthan) debido a su precio mas bajo.

Las diferentes variedades de serpentinitas presentes en nuestro estudio son: *Verde Pirineos* y *Verde Macael*, ambas de origen español.

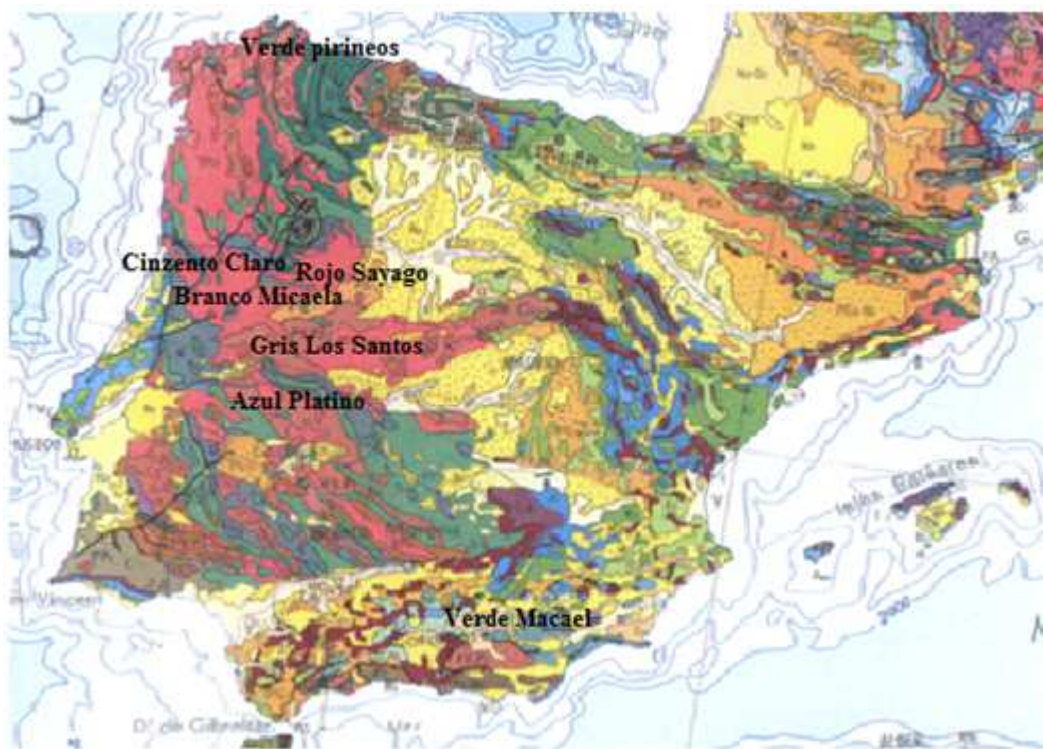


Fig. 4. Mapa de localización de las diferentes procedencias de las rocas del estudio.



6.1 GRANITO “GRIS LOS SANTOS”

El granito Gris Los Santos se explota en el término municipal de Los Santos, al Suroeste de la provincia de Salamanca. Es un Granito de grano medio – grueso, de textura porfídica. Composicionalmente se clasifica como un monzogranito cordierítico o granodiorita. Es de color gris claro y aflora en grandes masas, poco diaclasadas, que permiten la extracción de grandes bloques.

En el pasado, este granito se elaboraba en gran medida de forma artesanal, a pie de cantera. Hoy en día se utiliza maquinaria moderna de corte, como sierras e hilo diamantado para producir adoquines, bordillos, bancos, y otros productos.

Dadas las características físico - mecánicas de esta roca (Tabla 7), se utiliza fundamentalmente para pavimentado de calles y plazas y amueblamiento urbano. No es aconsejable su utilización como tableros pulidos, debido a que las biotitas tienden a alterarse y a dar cercos de óxidos de hierro. Además, la cordierita está altamente cloritizada y no respondería a un pulido homogéneo.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Minerales principales: Cuarzo, feldespato potásico y feldespato cálcico (plagioclasa).

Minerales accesorios: Moscovita, biotita, cordierita y minerales opacos.

Secundarios: Clorita derivada de la alteración de la biotita y la cordierita.

Peso específico aparente (Kg/m ³)	2.660
Coeficiente de absorción (%)	0,30
Resistencia mecánica a compresión (Mpa)	135
Resistencia mecánica a Flexión (Kg/cm)	11,02
Resistencia a desgaste por impacto (cm)	73,75
Resistencia al desgaste por abrasión (mm)	2,90
Resistencia a las heladas (% variación flexión)	0,01
Carga de rotura para anclajes (N)	2.081,06
Módulo elástico	11.142
Microdureza de Knoop (Mpa)	3.702,33

Tabla 7. Características técnicas del granito Gris Los Santos. García de los Ríos y Báez Mezquita (2001).



El granito de Los Santos se comercializa como superficies terminadas con corte con disco, partido o abujardado. También se aplica el flameado, que consiste en aplicar una llama a 45° C de inclinación hasta alcanzar temperaturas de unos 2.800 °C. Se produce un estallido de algunos minerales, sobre todo del cuarzo, que proporciona un aspecto rústico al granito, así como propiedades antideslizantes por efecto de la rugosidad adquirida.

En las muestras utilizadas para este trabajo hemos incluido dos facies de granito de Los Santos. Para ver si se obtenían resultados diferentes:

Gris Los Santos 1: muestra de la típica composición de granito de Los Santos (Fig. 5).

Gris Los Santos 2: muestra del granito de Los Santos que incluye grandes inclusiones de feldespatos y enclaves o schliesen (Fig. 6 y 7).



Fig. 5. Muestra 1.

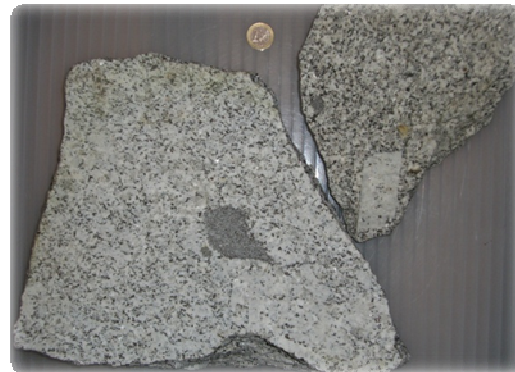


Fig. 6. Muestra 2.



Fig. 7. Extracción de Granito en el municipio de Los Santos



6.2 GRANITO “ROJO SAYAGO”

El granito Rojo Sayago se explota en diversas canteras que se encuentran en Piñuel (Zamora). Esta roca se extrae en la cantera y se traslada en bloques a Los Santos (Salamanca), donde se elabora todo tipo de material de cantería.

Petrologicamente, se trata de un episienita, de color rojo, de grano grueso, porfídica debido a la presencia de grandes cristales de feldespato potásico (Fig. 8). Estas rocas, cuyas características se pueden observar (Tabla 8) afloran rodeadas de rocas básicas e intermedias que podrían ser el origen de la episienitización de un granito original. Además, la episienitización parece estar ligada a un proceso de deformación muy fuerte que afecta a la roca y que es muy evidente en las maclas de la plagioclasa.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Minerales principales: Feldespato potásico, feldespato cálcico (plagioclasa) y biotita.

Minerales accesorios: Cordierita, moscovita.

Secundarios: Clorita, carbonatos y sericita.

Peso específico aparente (Kg/m ³)	2.530
Coefficiente de absorción (%)	0,67
Resistencia mecánica a compresión (Mpa)	107
Resistencia mecánica a Flexión (Mpa)	18,35
Resistencia a desgaste por impacto (cm)	51
Resistencia al desgaste por abrasión (mm)	1,80
Resistencia a las heladas (% variación flexión)	0,02

Tabla 8. Características técnicas del granito Rojo Sayago. García de los Ríos y Báez Mezquita (2001).

Debido a sus características, esta roca se utiliza con terminación rústica, aplicando acabados como el abujardado. No se aconseja su pulido porque, si bien resalta más su color rojo, la fuerte alteración de las biotitas a cloritas puede dar lugar a que con el tiempo éstas se pierdan, dejando huecos en su lugar. Se utiliza mayormente para amueblamiento urbano: desde placas, adoquines, tablas... (Fig. 9 y 10). Es frecuente su utilización en combinación con granitos grises.



Fig. 8. Muestra de granito Rojo Sayago para los ensayos.



Fig. 9. Losas de granito Rojo Sayago en el casco histórico de Salamanca.



Fig. 10. Losas de Granito Rojo Sayago en el casco histórico de Salamanca



6.3. GRANITO “AZUL PLATINO”

El granito Azul Platino se extrae en la localidad de Trujillo, en la provincia de Cáceres. Petrológicamente se trata de un granito de dos micas y tiene un color violáceo – gris oscuro. Es un granito heterogéneo y compacto, de tonalidad azul y grano medio y grueso. De fractura irregular. Los cristales de cuarzo tienen un color violáceo, con alteraciones superficiales de tonos verdosos (Fig. 11).

Tiene una buena canterabilidad y grandes reservas. Debido a sus características técnicas (Tabla 9) admite todo tipo de usos y acabados. Es uno de los granitos más exportados de Extremadura.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Minerales principales: Cuarzo, feldespato potásico y en menor medida feldespato cálcico (plagioclasa).

Minerales accesorios: Moscovita y biotita.

Minerales secundarios: Clorita, sericita.

Peso específico aparente (Kg/m ³)	2.650
Coefficiente de absorción (%)	0,8
Resistencia mecánica a compresión (Mpa)	160
Resistencia mecánica a Flexión (Mpa)	14,4
Resistencia a desgaste por impacto (cm)	50
Resistencia al desgaste por abrasión (mm)	19
Resistencia a las heladas (% variación flexión)	0
Carga de rotura para anclajes (N)	3.150
Módulo elástico	16.135
Microdureza de Knoop (Mpa)	2081

Tabla 9. Características técnicas del granito Azul Platino. (Atlas de las rocas ornamentales de Extremadura).



Fig. 11. Muestra del granito Azul Platino.



6.4 GRANITO “BRANCO MICAELA”

La variedad de granito Branco Micaela también es designado bajo el nombre de Blanco Aguiar debido a que su lugar de procedencia se encuentra dentro del concejo de Aguiar da Beira, más concretamente en la freguesía de Eirado. Se trata de un granito de dos micas de color claro levemente azulado y con un tamaño de grano fino a medio. Es ligeramente porfiroide (Fig. 12).

Este tipo de granito constituye una facies particular en el seno del gran macizo de granito porfiroide, que aflora en la región centro-norte de Portugal.

El granito comercial Branco Micaela, debido a sus características, (Tabla 10) se utiliza principalmente tanto para interiores como para exteriores.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Minerales principales: Microclina, cuarzo y plagioclasa

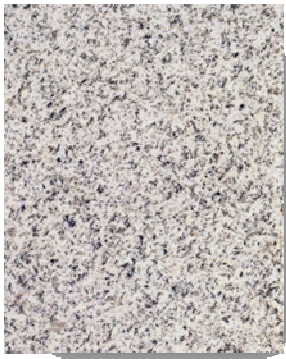
Minerales accesorios: Moscovita, biotita, zircón, monazita, apatito, rutilo, fluorita y minerales opacos.

Minerales secundarios: Clorita.

Peso específico aparente (Kg/m ³)	2.630
Coefficiente de absorción (%)	0,6
Resistencia mecánica a compresión (Mpa) ¹	180
Resistencia mecánica a Flexión (Mpa)	16,1
Resistencia a desgaste por impacto (cm)	60
Resistencia al desgaste por abrasión (mm)	0,3
Resistencia a las heladas (% variación flexión)	0

Tabla 10. Características técnicas del granito Branco Micaela. (<http://rop.ineti.pt/rop/>).

Las reservas para este tipo de granito son abundantes, a pesar de ello, en el macizo hay una ligera variación textural hacia grano medio que puede tener menos interés comercial que el granulado fino a medio.



*Fig. 12. Muestra de granito
Branco Micaela.*



6.5 GRANITO “CINZENTO CLARO”

Esta variedad de granito también se conoce como “Cinzento Claro de Pedras Salgadas” o “Pedras Salgadas”; procede de la freguesía de Bragado, dentro del concejo de Vila Pouca de Aguiar. Se trata de un granito de dos micas de color claro y tamaño de grano medio. Es una variedad predominantemente biotítica, con megacristales de feldespato potásico y cálcico (Fig. 13).

El granito de Pedras Salgadas forma parte de una mancha alargada de granito calcoalcalino, que se extiende desde Vidago hasta el sur de Vila Pouca de Aguiar (Tras-os-Montes).

El granito Cinzento Claro se usa indistintamente en interiores y exteriores por sus propiedades físico – mecánicas (Tabla 11).

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Minerales principales: Microclina, oligoclasa, cuarzo, biotita .

Minerales accesorios: Moscovita, zircón, apatito esfena y minerales opacos.

Peso específico aparente (Kg/m ³)	2.620
Coeficiente de absorción (%)	0,6
Resistencia mecánica a compresión (Mpa)	237
Resistencia mecánica a Flexión (Mpa)	15,5
Resistencia a desgaste por impacto (cm)	65
Resistencia al desgaste por abrasión (mm)	0,2
Resistencia a las heladas (% variación flexión)	0

Tabla 11. Características técnicas del granito Cinzento Claro. (<http://rop.ineti.pt/rop/>).

Las reservas para este granito en la zona son prácticamente ilimitadas.



*Fig. 13. Cantera de explotación del granito
Cinzento Claro.*



6.6 SERPENTINITA “VERDE PIRINEOS”

Esta roca se explotaba en la localidad de Moeche, donde aparecen afloramientos de dimensiones reducidas y donde se puede apreciar el alto grado de deformación y cizallas que recorren la roca (*Pereira et al. 2008*). Este afloramiento se encuentra dentro del complejo de Cabo Ortegá, que es uno de los complejos ultramáficos que se encuentran en España (Fig. 14). La roca serpentinizada es conocida como “mármol verde” y fue usada desde hace tiempo como material de construcción bajo el nombre comercial de Verde Pirineos.

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Minerales principales: Diferentes fases de serpentina, con relictos de olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno y espinela en diferentes proporciones.

Minerales accesorios: Espinela verde y anfíboles que pueden ser productos secundarios del piroxeno.

Minerales secundarios: Clorita, talco y dolomita.

Peso específico aparente (Kg/m ³)	2.700
Coefficiente de absorción (%)	0,93
Resistencia mecánica a compresión (Mpa)	34,46
Resistencia mecánica a Flexión (Mpa)	5,92

Tabla 12. Características técnicas de la serpentinita Verde Pirineos. (RocMáquina (2007)).

Las propiedades mecánicas de estas rocas (Tabla 12) dependen, entre otros factores, de la variedad de superficies anisótropas. Esto es porque algunas propiedades mecánicas cambian según la orientación de estas superficies respecto a los esfuerzos aplicados. El grado de serpentización de la roca es generalmente correlacionado con el valor de la absorción de la roca.



Fig. 14. Cantera abandonada de la serpentinita Verde Pirineos.



6.7 SERPENTINITA “VERDE MACAEL”

Esta variedad de roca se extrae en la provincia de Almería, en la localidad de Macael, que le da el nombre comercial a esta serpentinita. Estas rocas presentan una gran cantidad de venas y fracturas que, a diferencia de la “Verde Pirineos”, están rellenas de calcita (Fig. 15). Las características técnicas de esta roca se presentan a continuación (Tabla 13).

CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS

Minerales principales: Piroxeno y olivino.

Minerales accesorios: Minerales opacos y tremolita - actinolita.

Minerales secundarios: Serpentina, clorita y dolomita – magnesita

Peso específico aparente (Kg/m ³)	2.810
Coefficiente de absorción (%)	0,20
Resistencia mecánica a compresión (Mpa)	82,7
Resistencia mecánica a Flexión (Mpa)	13,5
Resistencia a desgaste por impacto (cm)	68
Resistencia al desgaste por abrasión (mm)	19
Resistencia a las heladas (% variación flexión)	0,02
Carga de rotura para anclajes (N)	3550

Tabla 13. Características técnicas de la serpentinita Verde macael. (RocMáquina (2007)).

Tanto su mineralogía como su composición química reflejan su transformación a carbonatos. No obstante, en el estudio petrológico se observa que existen restos de la mineralogía original.



Fig. 15. Muestra de serpentinita comercial Verde Macael que ha sido pulida para su uso como roca ornamental.

PARTE VII

METODOLOGÍA

DEL TRABAJO



METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Para la realización de este trabajo se recogieron muestras de diferentes rocas naturales comerciales, comúnmente utilizadas como materiales de construcción en España y Portugal. Dichas muestras fueron obtenidas directamente en las canteras de extracción o fueron solicitadas a los proveedores de este tipo de materiales. Las muestras utilizadas en este estudio están compuestas por dos granitos comerciales de origen portugués y tres granitos y dos serpentinitas de procedencia española.

Las muestras fueron sometidas a diferentes ensayos en laboratorio con la intención de obtener las tasas de emanación de radón de estas rocas, tanto al aire como al agua. Una vez obtenidas dichas medidas, se procedió a determinar las correspondientes estimaciones de la dosis de radiactividad por inhalación de Rn que producirían estas rocas en diferentes situaciones para determinar su correcta utilización como material de construcción. Esta estimación se realizó según lo establecido en la Norma 112 de Protección Radiológica de la Unión Europea.

En la realización de este trabajo también se procedió a un análisis químico de las rocas para intentar determinar la correspondencia de elementos radiactivos presentes en las muestras (U, Th y K) con las consiguientes tasas de emanación de Rn.

Las muestras de rocas fueron lavadas para evitar la posible presencia de materia orgánica y posteriormente fueron molidas y tamizadas hasta alcanzar un tamaño de grano inferior a 4 mm de donde separamos una parte de tamaño inferior a 1 mm. Una vez obtenidas las muestras molidas fueron sometidas a los diferentes ensayos de laboratorio, tanto en la Universidad de Salamanca como en la Universidad de Coimbra.



7.1 EXHALACIÓN DE RADÓN AL AIRE

Para la determinación de la cantidad de Rn en el aire se separó 1 kg de material de tamaño inferior a 4 mm de cada muestra que fue depositado en recipientes de plástico, los cuales fueron etiquetados con el correspondiente nombre comercial de la roca a la que pertenece la muestra (Fig. 16). Estos recipientes fueron introducidos en una estufa para secar la muestra y así eliminar la mayor cantidad posible de humedad presente en la roca.

Una vez secas las muestras fueron introducidas en unos recipientes metálicos junto con una cierta cantidad de silica para controlar la humedad. Estos recipientes metálicos tienen una capacidad de 12 litros y están homologados para el uso o transporte de sustancias peligrosas.

Los recipientes fueron sellados y se utilizó cinta de aluminio para tapar todos los posibles huecos o juntas por donde pudiera escapar el Rn y así garantizar que el contenedor queda herméticamente cerrado. Dicho contenedor lleva incorporadas unas válvulas en la parte superior que se conectan al instrumental y así medir la concentración de radón en el interior del contenedor.

Las muestras permanecen en los contenedores durante un período mínimo de 21 días para que se establezca el Ra contenido en la muestra con el Rn contenido en el aire (Fig. 17). Esto se realiza de esta manera porque si realizáramos la medida a las 12 o 48 horas de haber introducido la muestra, obtendríamos una recta dependiendo del material a partir de la cual se podría obtener los resultados mediante ecuaciones, pero el problema que se presenta en esta situación son las



Fig. 16. Recipiente preparado para ser introducido en el contenedor.



variaciones que experimenta el Rn con la presión y la temperatura e incluso con la variación gravitatoria terrestre que modifica los resultados obtenidos. Se ha observado que durante las horas en las que el sol permanece en su cenit, éste ejerce una fuerza de atracción ligeramente anormal sobre la tierra pero que es capaz de atraer o mover la inmensa mayoría de los átomos de Rn. La concentración de Rn también es afectada por los cambios de humedad, presión y temperatura, lo cual modifica las medidas de un día para otro pues en el laboratorio se puede controlar la temperatura y/o la humedad pero no la presión del aire.



Fig. 17. Contenedores sellados y etiquetados para su almacenamiento.

Una vez transcurridos 48 días, se conectaron las válvulas de los contenedores al detector de Rn. Para medir la concentración de gas Rn se usó un equipo con cámara de ionización *Alphaguard 2000 Pro*, de *Genitron Instruments* ® con calibración certificada. La determinación de la concentración de Rn fue efectuada a partir del procedimiento establecido por el fabricante del equipo (*Gonçalves et al (2006)*) (Fig. 18). El gas producido dentro del contenedor fue extraído con ayuda de una bomba con un caudal controlado de 1 l/min y conducido a través de un circuito apropiado hasta la cámara de ionización donde fue medida su concentración. Dicha cámara está conectada a un

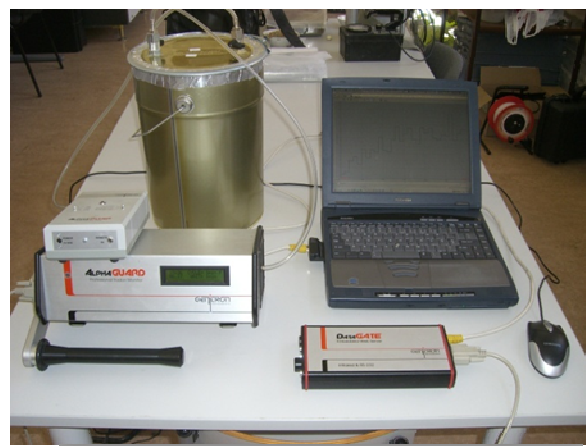


Fig. 18. Instrumental preparado para realizar la medición de gas Rn en los contenedores.



ordenador donde se registra las medidas tomadas en intervalos de tiempos de 10 minutos. Los 10 primeros minutos son para que se establezca la medida y una vez estabilizada medimos la media de cada período, con una duración total de cada ensayo de aproximadamente dos horas para cada muestra (Fig. 19).

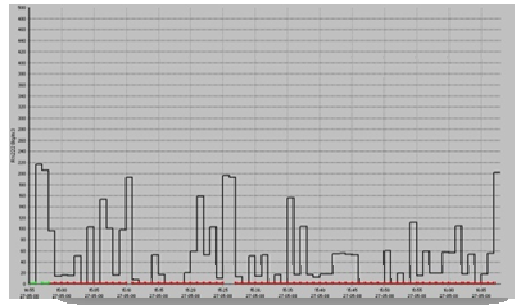


Fig. 19. Gráfica que se obtiene como resultado del ensayo.

Una vez obtenida la concentración de gas Rn en el aire, determinamos la tasa de emanación de radón aplicando la ecuación:

$$C = \frac{C_f \times V}{W} \times \lambda$$

Donde:

C = Tasa de emanación de gas Rn (Bq Kg⁻¹ hr⁻¹).

C_f = Concentración de gas Rn medida al final de período de acumulación (Bq/m³).

V = Volumen del contenedor (m³).

W = Peso de la muestra (Kg).

λ = constante de desintegración del Rn (hr⁻¹) = 0,00755 hr⁻¹.



7.2 EXHALACIÓN DE RADÓN AL AGUA

Para determinar la concentración de Rn en el agua, tomamos 100 gramos de cada muestra correspondiente a la fracción fina inferior a 1mm, cantidad que fue introducida en unos recipientes transparentes de laboratorio con una capacidad de 500 ml. A estos frascos se les añadirá agua hasta completar su capacidad sin que quede nada de aire en su interior; esto es muy importante porque si queda algo de aire dentro, el Rn no pasa al agua, que es de lo que se trata (Fig. 20).

Los frascos con la muestra mezclada con el agua se etiquetaron con los respectivos nombres comerciales y se dejaron reposar durante un mínimo de 21 días, al igual que en el ensayo anteriormente descrito. Una vez pasado este tiempo se considera que se ha alcanzado el equilibrio entre el Ra contenido en la muestra y el Rn que ha pasado al agua. Así pues, podemos, determinar a partir del Rn que hay en el agua, la cantidad de Ra que tenía la muestra.



Fig. 20. Recipientes cerrados herméticamente donde se produce el paso del radón al agua para su posterior análisis.

Después de que las muestras fueron almacenadas durante 48 días, se extrajeron 10 mm³ del agua contenida en cada uno de los frascos con 100 gr de muestra inferior a 1mm. Estos 10 mm³ los hemos colocado en unos frascos de cristal junto con 10 mm³ del ácido *Betaplate Scint*, para determinar la cantidad de Rn en el agua.

Suponemos el equilibrio entre el Ra contenido en la roca y el Rn que ha pasado al agua, lo que hace que este método nos proporcione una medida indirecta. Los resultados



Radiactividad natural en materiales de construcción

obtenidos los podremos relacionar con los resultados obtenidos del experimento de medición de la concentración de Rn en el aire de los contenedores.

Para el análisis de contenido de Rn se utilizó el espectrómetro *Liquid Scintillation Spectrometer Quantulus 1220*. La medida del Rn se obtiene porque la desintegración de U para dar radón da lugar a una partícula α que es registrada por el espectrómetro. Este aparato detecta la emisión de partículas α y β y su energía, por tanto identifica la radiactividad del elemento en concreto que pretendemos medir.

PARTE VIII

RESULTADOS



RESULTADOS

8.1 ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico se ha realizado mediante un ICP – MS, en el Servicio de Análisis Químico de la Universidad de Salamanca. Se han determinado todos los elementos mayores y trazas. En este trabajo incluimos solo los elementos radiogénicos con estos límites de detección (Tabla 14).

<i>Elemento</i>	Th	U	K
<i>Límite de detección</i>	0,5	0,5	0,11

Tabla 14. Límites de detección de los elementos analizados

Muestra	Th	U	K
	(ppm)	(ppm)	(%)
Azul Platino	2	7	4.12
Gris Los Santos. 1	5	2	3.92
Gris Los Santos. 2	5	4	5.00
Verde Macael	1	0.2	0.02
Rojo Sayago	21	6	7.29
Verde Moeche.1	2	0.7	<ld
Verde Moeche.2	1	0.3	0.02
Aguiar da Beira	10	21	4.43
Pedras Salgadas	13	6	4.46

Tabla 15. Resultados obtenidos en el análisis químico para los elementos radiogénicos Th, U, K.

En los resultados obtenidos del análisis químico realizado, las serpentinitas mostraron un contenido muy bajo en elementos radiogénicos, con el Th en un rango de 1- 2 ppm, y el uranio comprendido entre 0,2 y 0,7; el K²²⁰ es algo bajo, alrededor de un 0,02%. Como era de esperar, los granitos muestran un rango más elevado de concentraciones, con unos valores de U y Th en un rango de 2 – 221 ppm (Tabla 15 y Fig. 21).

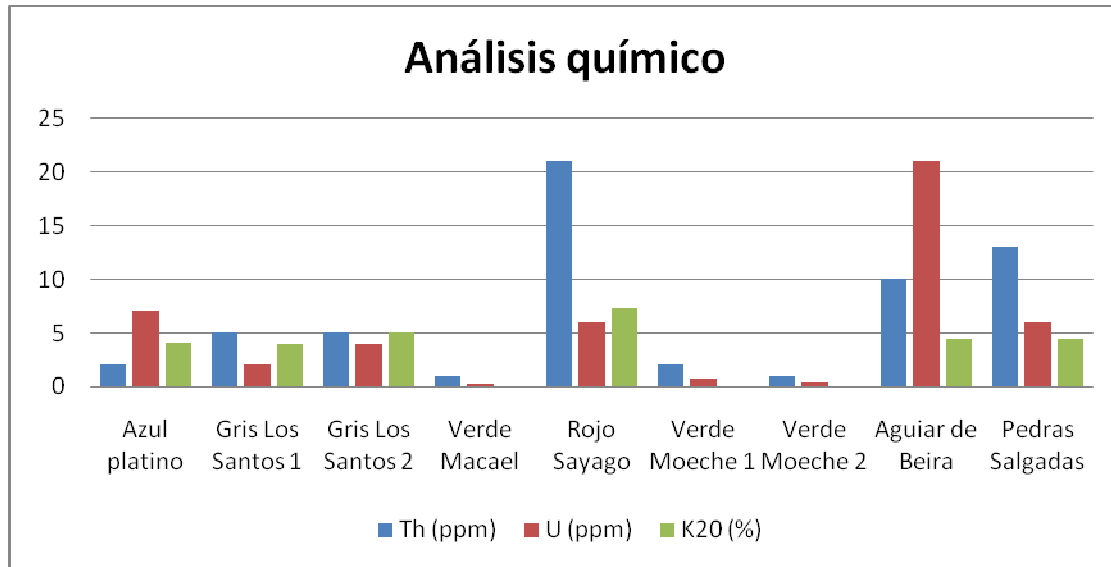


Fig. 21. Resultados obtenidos en el análisis químico para los elementos U, Th y K.

Las variedades Azul Platino y Gris Los Santos son los granitos más evolucionados, como se puede observar por su bajo contenido de Th (2 – 5 ppm). Las variedades portuguesas Aguiar de Beira y Pedras Salgadas, al igual que el español Rojo Sayago, presentan las más elevadas concentraciones medias de Th y U. Los granitos presentan un contenido típico del 4 al 5% de K₂O, con la excepción del rojo Sayago, que presenta un alto contenido de 7,29%.

En las figuras (Figs. 22, 23 y 24) se muestran los resultados obtenidos del análisis químico de elementos radiogénicos de las muestras, por separado.

En estos resultados podemos observar como la variedad de granito español Rojo Sayago presenta los valores más altos para la concentración de Th con un resultado de 21 ppm, valor que prácticamente dobla la cifra para el contenido en Th del granito de Pedras Salgadas. Casualmente, el Rojo Sayago también presenta la máxima concentración de K²²⁰ de todas las muestras analizadas, un 7,20%. En lo que se refiere al contenido del U como elemento radiogénico, es la variedad de granito portugués de Aguiar de Beira la que presenta el valor máximo, con una cifra de 21 ppm, que supera en gran medida a los valores obtenidos para las demás muestras.

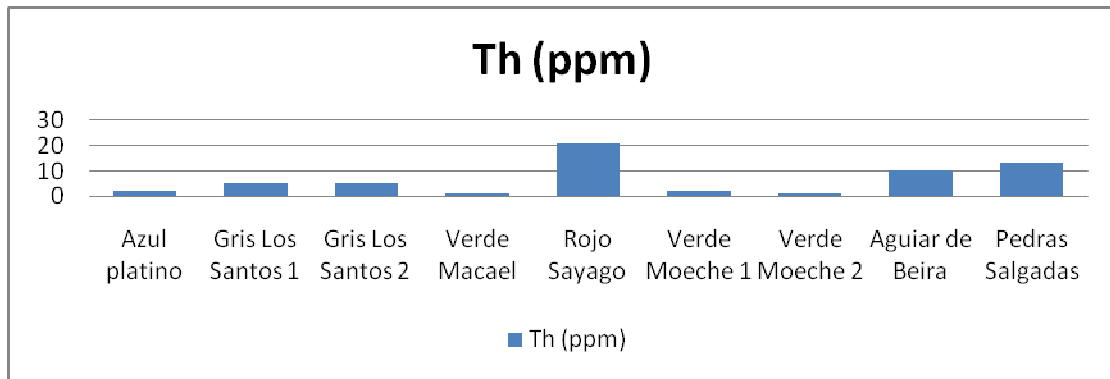


Fig. 22. Resultados del análisis químico para el Th.

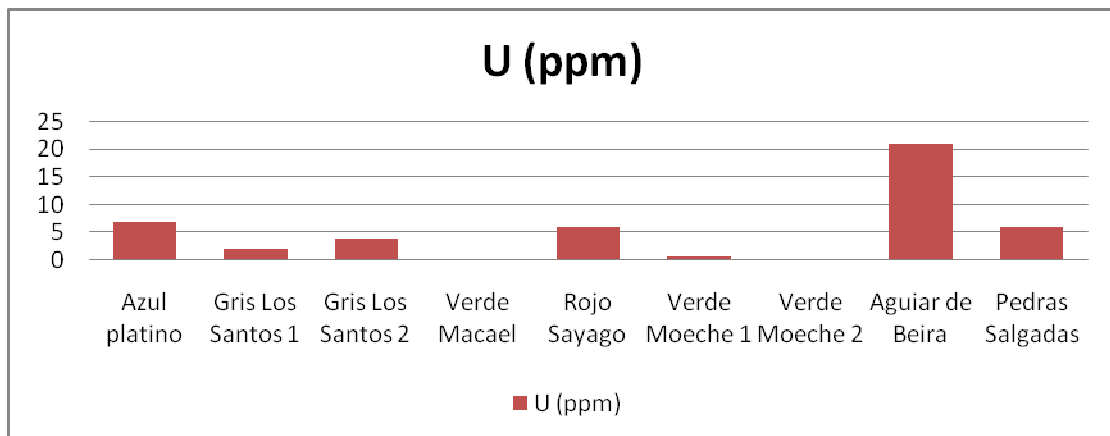


Fig. 23. Resultados del análisis químico para el

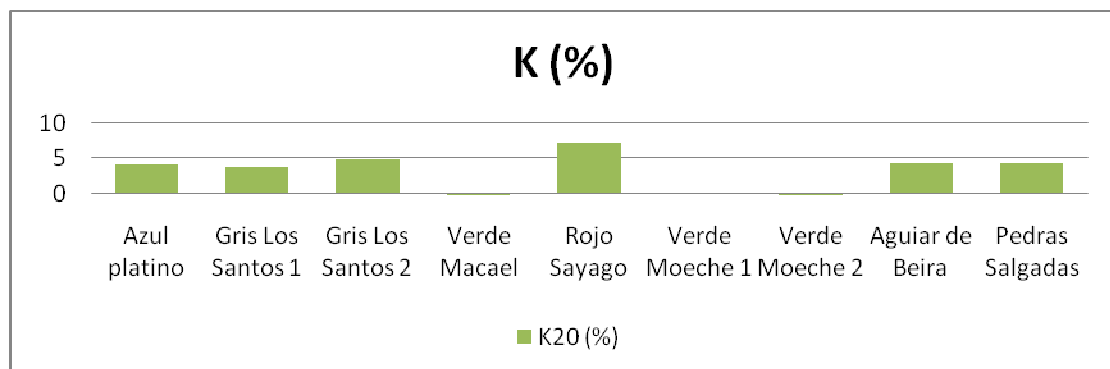


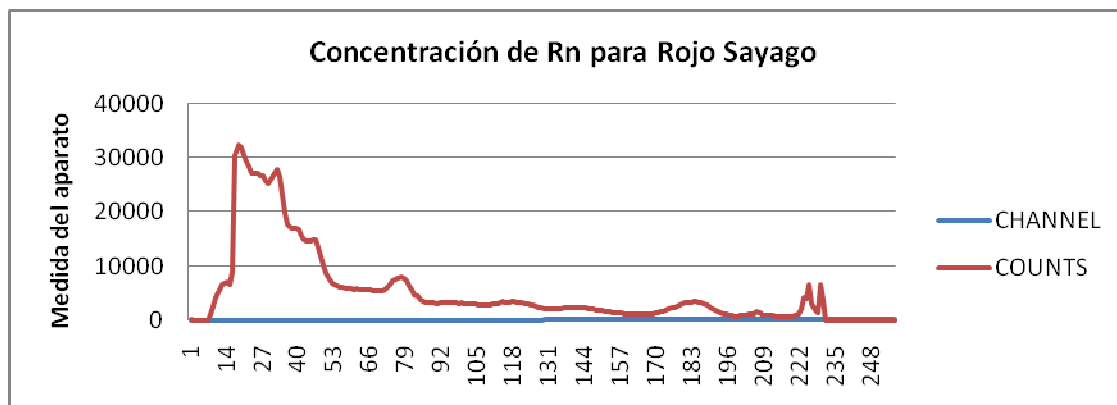
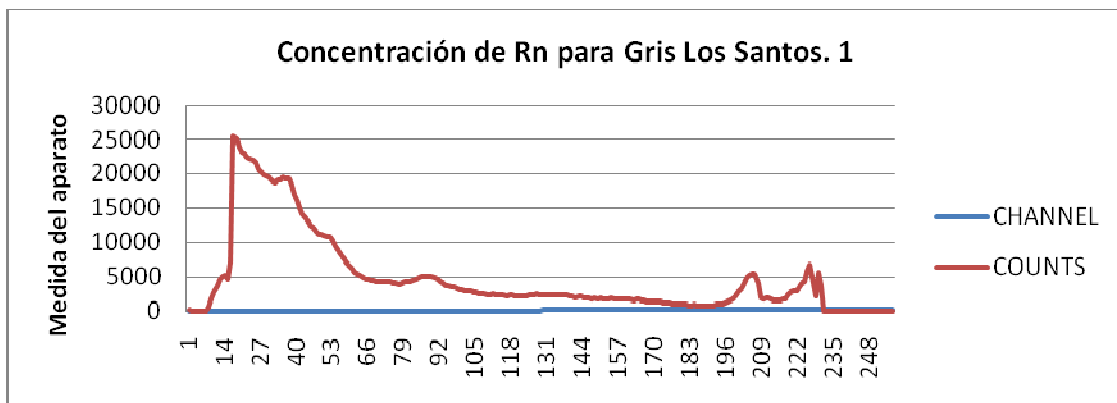
Fig. 24. Resultados del análisis químico para el K.



8.2 EXHALACIÓN DE RADÓN AL AIRE

Para la realización de este ensayo se utilizaron únicamente las muestras de rocas naturales españolas, ya que no se pudo obtener de los granitos portugueses la cantidad necesaria (1 Kg.) para la realización de dicha medida.

Una vez reducidas las muestras de rocas a un tamaño inferior a 4 mm, se colocaron en unos contenedores impermeables al radón donde se almacenaron durante mas de 21 días hasta asegurar el equilibrio radiogénico. Una vez transcurrido este período se conectó el contenedor a un detector de Rn donde se realizó la medida de la concentración de Rn en el interior del contenedor (Fig. 25 y 26).



Figs. 25 y 26. Ejemplo de gráficas obtenidas durante las dos horas de duración de cada ensayo para las muestras de granitos españoles.



Muestra	Tasa de exhalación Bq.kg.hr ⁻¹
Azul Platino	0.020
Verde Moeche. 1	0.006
Verde Moeche. 2	0.003
Verde Macael	0.003
Gris los Santos. 1	0.090
Gris los Santos. 2	0.060
Rojo Sayago	0.100

Tabla 16. Resultados de los análisis de concentración de Rn en el aire.

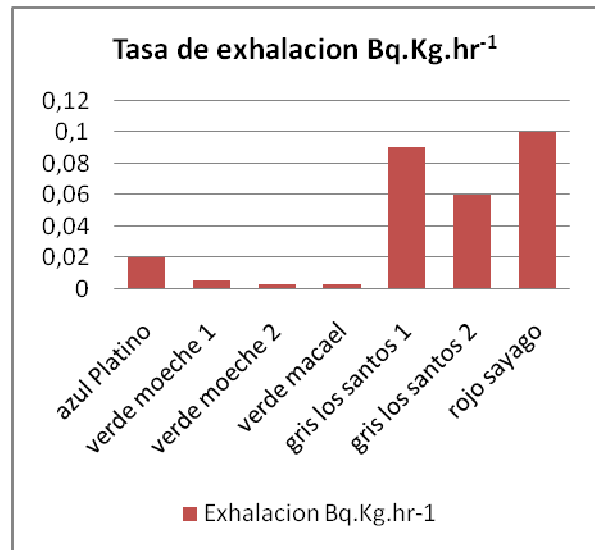


Fig. 27. Tasa de exhalación de Rn.

Las medidas realizadas por el detector se reciben en el ordenador en tiempo real, dando como resultado una gráfica que varía ligeramente dependiendo de la muestra. Para determinar la tasa de emanación de Rn se utiliza la media de todos los valores obtenidos en el ensayo.

La tasa de exhalación obtenida para las serpentinitas es un orden de magnitud inferior que el obtenido para los granitos. Los resultados de las serpentinitas se encuentran en un rango entre 0.003 a 0.006 Bq.kg.hr⁻¹, mientras que los granitos tienen unos valores que van desde 0,020 hasta 0,100 Bq.kg.hr⁻¹. El máximo valor de exhalación obtenido en los ensayos corresponde al granito Rojo Sayago, que presenta una tasa de exhalación de 0,1 Bq.kg.hr⁻¹, muy próxima a los 0,090 Bq.kg.hr⁻¹ obtenidos para el granito de Los Santos 1 (Tabla 16 y Fig. 27).

8.3 EXHALACIÓN DE RADÓN EN EL AGUA

Un segundo test independiente para medir la exhalación de Rn fue llevado a cabo, en el agua. Las muestras de roca del estudio de tamaño inferior a 1mm fueron depositadas en recipientes transparentes de 500 mm³ de capacidad, completamente rellenos de agua. Después de unos 48 días, el agua de las muestras fue extraída y el contenido de Rn en equilibrio fue medido con un espectrómetro de escintilación líquida. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



Muestra	Rn Bq.l ⁻¹
Azul Platino	0.9
Verde Moeche. 1	<ld
Verde Moeche. 2	<ld
Blanco Micaela	1.1
Verde Macael	0,1
Gris los Santos. 1	3.2
Gris los Santos. 2	2.0
Rojo Sayago	3.1
Cinzeno Claro	1

Tabla 17. Resultados de los análisis de concentración de Rn en el agua.

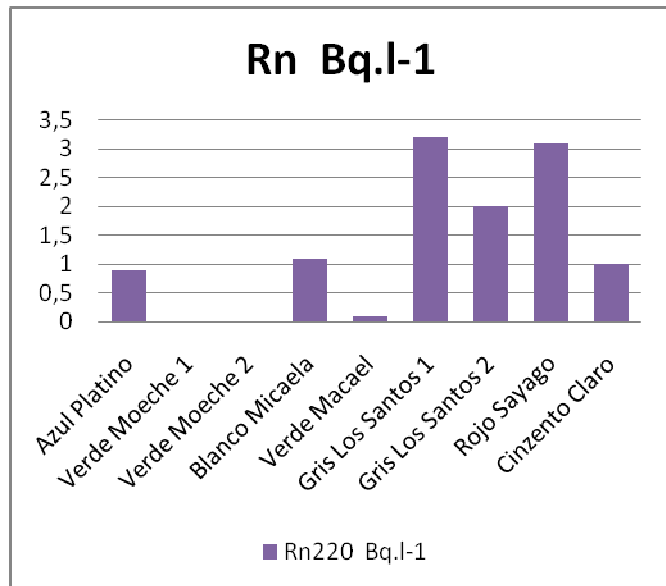


Fig. 28. Concentración de Rn en el agua

Las serpentinitas se situaron por debajo de límite de detección del equipo ($< 0, 1$ Bq.l⁻¹). Los granitos mostraron valores con un orden de magnitud superior, con un rango que va desde 0.9 Bq.l⁻¹ hasta 3.2 Bq.l⁻¹. En lo que se refiere a los granitos, los valores mas bajos encontrados correspondieron a la variedad Azul Platino.

Los valores de concentración de Rn mas elevados se obtuvieron en los granitos españoles, en las variedades Rojo Sayago y Gris Los Santos, con unos valores que exceden notablemente de los obtenidos para las otras muestras (Tabla 17 y Fig. 28).

PARTE IX

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES



DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se han estudiado un total de 9 muestras en las que se ha medido la radiactividad natural que de ellas se puede desprender. De estas muestras, 7 son granitos y 2 son serpentinitas. Dentro de los granitos, se estudiaron varios tipos comerciales y dentro de uno de ellos, el Gris los Santos, se estudiaron dos facies distintas, una de las cuales presentaba grandes enclaves y cristales de feldespato potásico (Gris Los Santos 2). La intención de este muestreo era observar la correlación que se presentaba en el análisis químico de la roca frente a la presencia de dichos elementos.

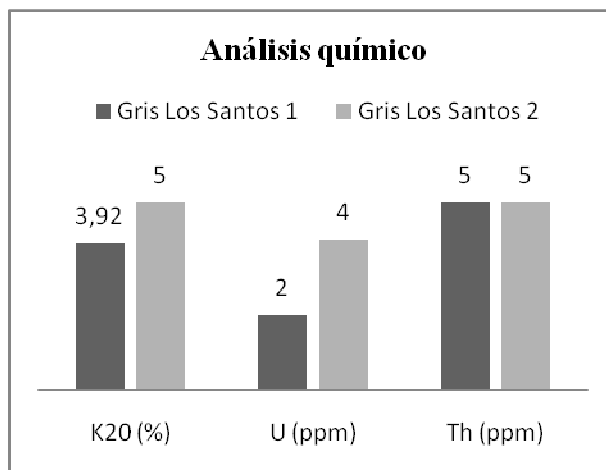


Fig. 29. Resultados del análisis químico para las dos muestras de granito Gris Los Santos.

Se puede observar en los resultados del análisis que, como era de esperar, existe un mayor contenido de uranio en la muestra que incluía enclaves y cristales de feldespato potásico (Fig. 29). Esta mayor proporción de U, de 4 ppm, es muy superior a la obtenida para la muestra número 1, que solo presentaba la mitad de U. Sin embargo, también se observó una mayor presencia del K en la muestra número 2 (5 ppm), debido sin

duda a la presencia de los cristales de feldespato potásico. Por el contrario la cantidad de Th obtenida para las dos muestras tiene un valor idéntico de 5 ppm.

Si presentamos en un diagrama de dispersión la tasa de exhalación de Rn frente al contenido de U de los tipos de rocas podemos observar que el contenido de U es el principal factor que controla la exhalación de Rn, con alguna variabilidad resultante de la actuación de otros factores (Fig. 30). Esto es especialmente el caso de la muestra del granito Azul Platino, que presenta la tasa de exhalación mas baja de todos los granitos, pero que tiene el más alto contenido de U. Una posible explicación para este hecho es que el U esta predominantemente relacionado con los minerales accesorios (-e.g. monacita,



apatito, zircón), permitiendo de este modo moverse al Rn de las estructuras cristalinas no más que en pequeñas proporciones.

Si enfrentamos en un gráfico similar los resultados de la exhalación de Rn en el aire frente a la exhalación de Rn en el agua obtenemos una correlación destacable, como podemos observar en la siguiente figura (Fig. 31 y Tabla 18).

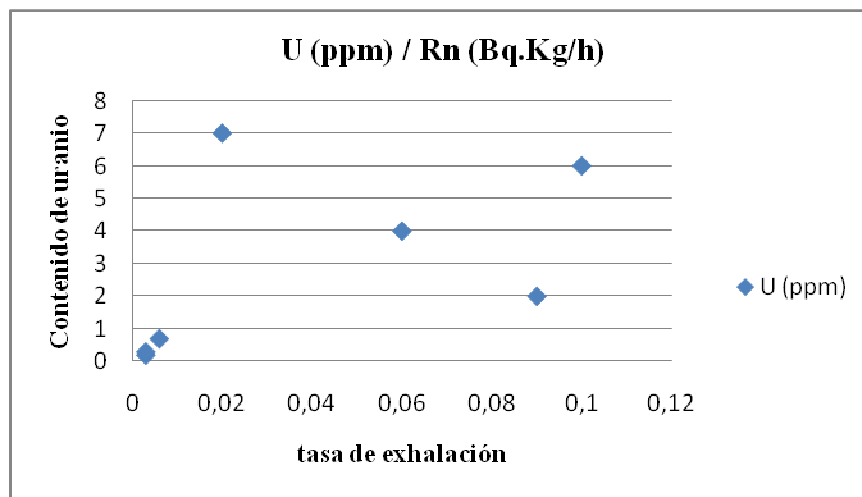


Fig. 30. Tasa de exhalación de Rn frente al contenido de uranio.

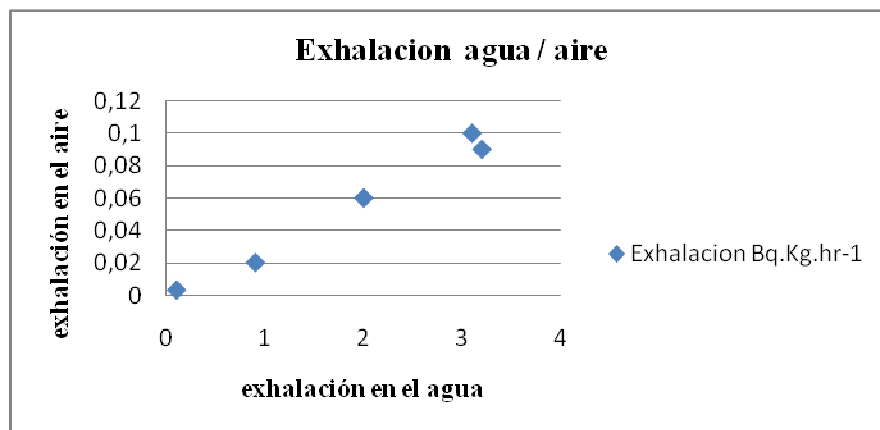


Fig. 31. Representación de la tasa de exhalación en el agua y en el aire. Solo se han representado aquellos valores por encima del límite de detección del equipo.



Muestra	Rn Bq.l⁻¹	Exhalación Bq.Kg.hr⁻¹
Azul Platino	0,9	0,02
Verde Macael	0,1	0,003
Gris Los Santos. 1	3,2	0,09
Gris Los Santos. 2	2	0,06
Rojo Sayago	3,1	0,1

Tabla 18. Resultados de la exhalación de Rn en el aire y en el agua.



9.1 DOSIS ESTIMADA DE ACUERDO AL MÉTODO DE LA NORMA TÉCNICA 112 DE LA UNIÓN EUROPEA

La dosis estimada en diversos entornos resultantes del uso de rocas como materiales de construcción puede ser determinada según el método propuesto en el documento de la unión Europea “Protección Radiológica 112”. En la ausencia de información referente a la actividad del Ra, nosotros estimamos este parámetro con el contenido de uranio de las rocas, asumiendo el equilibrio secular.

Diferentes escenarios pueden ser modelados para una habitación estándar, en función del uso de la roca en suelos, techos y paredes (C1), suelos y paredes (C2), sólo suelo (C3) y materiales superficiales –e.g. rocas en paredes con un espesor inferior a 3 cm (C4), y el valor de dosis (mSv.y⁻¹) resultante del uso de los materiales geológicos puede ser determinado.

Un parámetro fue así mismo propuesto en este documento como un indicador del grado de producción de radiación ionizante (I), y es representado en la tabla (Tabla 19). Los valores superiores a 1 indican que la roca debe ser usada con restricciones.

Muestra	C1	C2	C3	C4	I
Azul Platino	0.6	0.4	0.0	0.0	0.7
Gris los Santos.1	0.4	0.2	0.0	0.0	0.5
Gris los Santos.2	0.6	0.4	0.0	0.0	0.7
Rojo Sayago	1.3	0.9	0.1	0.0	1.3
Aguiar Beira	1.6	1.1	0.2	0.0	1.5
Pedras Salgadas	0.8	0.5	0.0	0.0	0.9
Macael	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Verde Moeche.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Verde Moeche.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabla 19. Valores de la dosis obtenida para diferentes escenarios y grado de producción de radiación ionizante.



Del análisis de la tabla se puede observar que las serpentinitas no producen prácticamente alguna radiación, y si son usadas extensamente como materiales de construcción probablemente ayuden a reducir el nivel de radiación en el interior de las casas, funcionando como un escudo ante la radiación del exterior. Los granitos muestran un amplio rango de valores, y dos facies deben ser usadas con restricciones: Rojo Sayago y Aguiar da Beira. El primero supera el máximo de dosis límite de 1 mSv por año recomendado por la UE en el escenario C1, y el último excede la misma dosis límite en los escenarios C1 y C2 (Figs. 32 y 33). De cualquier manera, considerando que los resultados representados aquí están basados en ambos casos en un único análisis y en condiciones extremas sin ventilación, consideramos que deben ser llevados a cabo más trabajos con la intención de confirmar los niveles de riesgo asociados con estas dos variedades de granito comercial. Además hay que tener en cuenta que estas variedades se usan fundamentalmente en ambientes de exterior, con lo que la influencia en la salud humana es nula en cualquier caso.

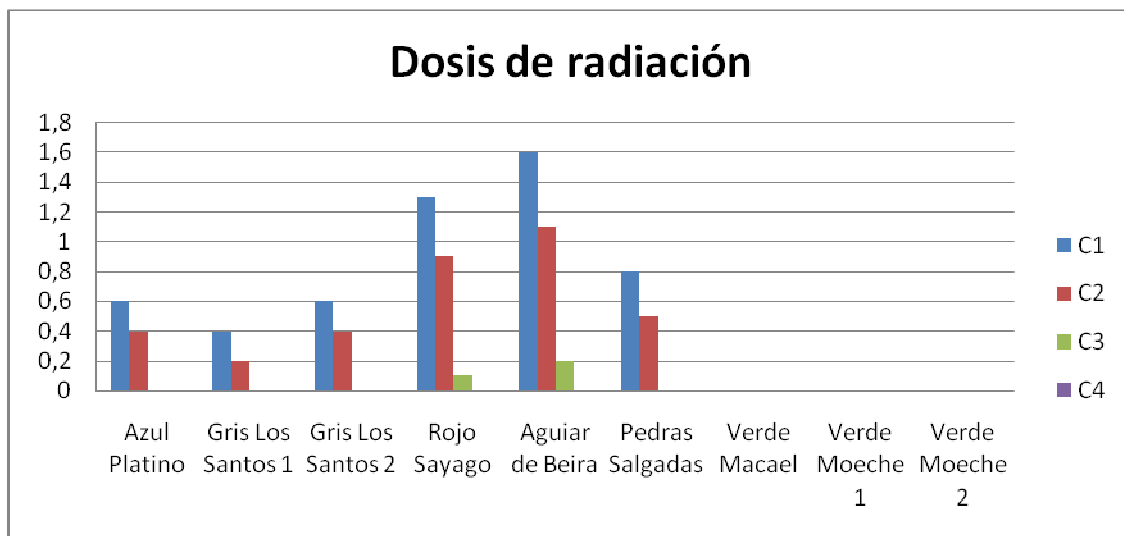


Fig. 32. Representación donde se puede observar como los granitos Rojo Sayago y Aguiar de Beira superan el valor límite de 1 mSv en el escenario C1. Asimismo el granito de Aguiar de Beira también supera la dosis límite en el escenario C2.

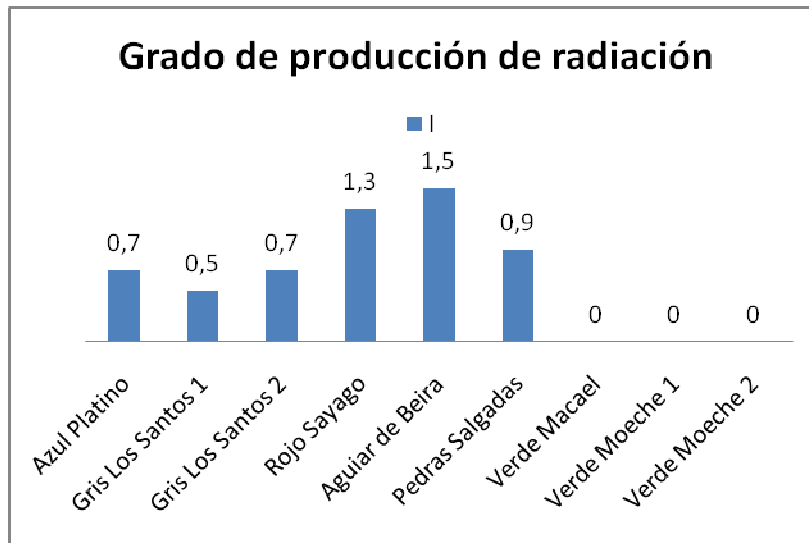


Fig. 33. Parámetro de radiación ionizante de las diferentes muestras y donde el granito Rojo Sayago y Aguiar de Beira presentan los valores mas altos superando el valor máximo de 1 en ambos casos.

PARTE X

BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

ANJOS, R.M., VEIGA, R., SOARES, T., SANTOS, A.M.A., AGUIAR, J.G., FRASCÁ, M.H.B.O., BRAGE, J.A.P., UZÊDA, D., MANGIA, L., FACURE, A., MOSQUERA, B., CARVALHO, C., GOMES, P.R.S. (2005): Natural radionuclide distribution in brazilian comercial granites. *Radiation measurements* 39. 245 – 253.

Asociación de Medicinas complementarias:
http://www.amcmh.org/PagAMC/ciar/boletines/cr_bol135.htm. Última visita junio de 2008).

DOVENTON, J.H., PRENSKY, S.E., (1992): Geological applications of wireline logs: a synopsis of developments and trends. *Log Anal.* 33 (3), 286 – 303.

EL – HUSSEIN, A. (2004): A study on natural radiation exposure in different realistic living rooms. *J. Environ. Radioactivity* 79, 355 – 367.

European Commission, Radiation Protection 112. Radiological protection Principles concerning the natural radioactivity of building materials, Office for official publications of the European Communities, Luxembourg (2000).

HIGGY, R.H., EL – TAHAWY, M.S., ABDEL – FATTAH, A.T., AL – AKABAWY, U.A. (2000): Radionuclide content of building materials and associated gamma dose rates in Egyptian dwellings. *J. Environ. Radioactivity* 50, 253 – 261.

ICRU. International Commission on Radiation Units and measurements.

Instituto Tecnológico de la Construcción (2007): Comercio exterior del sector de la piedra natural en España. <http://www.aidico.es/> (última visita Junio 2008)



Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (2004 – 2008). *e-Geo - Sistema Nacional de Informação Geocientífica. Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas*. <http://e-geo.ineti.pt/bds.htm> (última vista junio 2008)

Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação. *Rochas Ornamentais Portuguesas*. <http://rop.ineti.pt/rop/> (última visita Junio 2008)

JÖNSSON, G. (1997). Indoor radon surveys. In Radon Measurements by Etched Track Detectors. *Applications to Radiation Protection, Earth Sciences and the Environment*, eds. S. A. Durrani and R. III, pp. 157–177.

Junta de Extremadura (2004): *Atlas de las rocas ornamentales de Extremadura*.

LU, X., ZHANG, X. (2007): Natural radioactivity measurements in rock samples of Cuihua mountain national geological park, China. *Oxford Journals. Mathematics & Physical Sciences & Medicine. Radiation Protection Dosimetry*

MONNIN, M.M., SEIDEL, J.L. (1997). Radon measurement techniques. *Ilic and Durrani (Eds.), Radon Measurements by Etched Track Detectors. World Scientific Publishing, Singapore, ISBN 9810226667, pp. 51–65. Singapore.*

GARCÍA DE LOS RÍOS, J.I. y BÁEZ MEZQUITA, J.M. (2001): *La Piedra en Castilla y León. Ed. Junta de Castilla y León.*

GONÇALVES. C.V.M. (2006) - Avaliação dos níveis de radioactividade natural na região da Serra do Buçaco e factores geológicos condicionantes. *Dissertação de mestrado, Universidade de Coimbra, 107 p.*

OECD, 1979. Organization for Economic Cooperation and Development Exposure to Radiation from the Natural Radioactivity in Building Materials. Paris.



PAVLIDOU, S., KORONEOS, A., PAPASTEFANOU, C., CHRISTOFIDES, G., STOULOS, S., VAVELIDES, M. (2004): Natural radioactivity of granites used as building materials. *J. Environ. Radioactivity* 89, 48 – 60.

PEREIRA, D., YENES, M., BLANCO, J.A., PEINADO, M. (2005): Las serpentinitas y su correcta utilización en construcción. *RocMáquina* (2005). Septiembre 2005, 24 – 27.

PEREIRA, D., YENES, M., BLANCO, J.A., PEINADO, M. (2007): Characterization of serpentinites to define their appropriate use as dimension stone. *Geological Society, London, Special Publications*, 271, 55 – 62.

PEREIRA, D., PEINADO, M., BLANCO, J.A., YENES, M. (2008): Geochemical characterization of serpentinites at Cabo Ortegal, northwestern Spain. *The Canadian Mineralogist*. Vol. 46, pp. 317 – 327.

PORSTENDÖRFER, J., WICKE, A., SCHRAUB, A., 1980: Methods for a continuous registration of radon, thoron, and their decay products indoors and outdoors. *Natural Radiation Environment III. CONF – 780422*, vol. 2. U.S. Department of Energy, Washington, D.C., pp. 1293 – 1307.

RocMáquina (2008). *Revista de Mayo - Junio*. 58 – 61

RocMáquina (2007): *La piedra natural de España. Directorio profesional 19ª edición*

ROGERS, J.J.W., RAGLAND, P.C., (1961): Variation of thorium and uranium in selected granitic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta* 25, 99 – 109.

SESANA, L., FUMAGALLI, M., CARNEVALE, M., POLA, G., FACCHINI, U., COLOMBO, A., TUNESI, A., DE CAPITANI, L., RUSCONI, R. (2006): Natural radionuclides in the rocks of the Valle del Cervo Pluton in Piedmont. *Oxford Journals*.



Mathematics & Physical Sciences & Medicine. Radiation Protection Dosimetry. Volume 118, Number 3, 337 – 344.

STRANDEN, E., KOLSTAD, A.K., (1984): Radon exhalation from the ground; Method of measurements and preliminary results. *The Science of the Total Environment, Volume 45, October 1985, 165-17.*

TZORTZIS, M., TSERTOS, H., CHRISTOFIDES, S., CHRISTODOULIDES, G. (2003): Gamma radiation measurements and dose rates in commercially – used natural tiling rocks (granites). *J. Environ. Radioactivity 70, 223 – 235.*

UNSCEAR, 1979. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

UNSCEAR, 1982. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

UNSCEAR, 1993. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, United Nations, New York.

WHITFIELD, J.M., ROGERS, J.J.W., ADAMS, J.A.S., (1959): The relationship between the petrology and the thorium and uranium contents of some granitic rocks. *Geochim. Cosmochim. Acta 17, 248 – 271.*