



**TESIS DOCTORAL**

**TÍTULO**

ANÁLISIS DE LA EXTRACCIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE GRANITOS  
COMO ACTIVIDAD NORM. DISEÑO DE PROTOCOLO.

**NOMBRE Y APELLIDOS DEL AUTOR**

Juan José Tejado Ramos

**DEPARTAMENTO DE DEFENSA**

Física Aplicada

**AÑO DE LECTURA**

2014





**TESIS DOCTORAL**

**TÍTULO**

ANÁLISIS DE LA EXTRACCIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE GRANITOS COMO ACTIVIDAD NORM. DISEÑO DE PROTOCOLO.

**NOMBRE Y APELLIDOS DEL AUTOR**

Juan José Tejado Ramos

**DEPARTAMENTO DE DEFENSA**

Física Aplicada

**Conformidad de los Directores:**

Fdo: (Dr. D. Antonio Salvador Baeza Espasa) / Fdo: (Dr. D. Francisco Javier Guillén Gerada)

**AÑO DE LECTURA**

2014



*En la vida, no hay nada que temer, solo hay que comprender...*

*(Marie Curie)*



## Agradecimientos

Me gustaría que estos primeros párrafos de esta Tesis sirviesen como agradecimiento y reconocimiento para todas aquellas personas e instituciones que de forma voluntaria o involuntaria me han ayudado a lo largo de estos años.

Especial reconocimiento requieren mis Directores de Tesis (Antonio y Javier), cabezas visibles de LARUEX, por confiar en mí, apostar por mi idea inicial y no escatimar en medios técnicos y personales a la hora de llevar a cabo nuestra investigación.

Hacer extensivo este reconocimiento a mis actuales compañeros de INTROMAC, muchos de los cuales me ayudaron a superar momentos muy difíciles en esta “travesía”.

Agradecer a mis amigos Quintanenses (Jesús, Paco y Joaquín) toda la colaboración desinteresada en la toma de muestras en las instalaciones de su empresa, así como su disponibilidad personal y de todos aquellos recursos necesarios.

Me reservo esta última tanda de reconocimientos para mi familia y amigos, algunos de los cuales ya no están, pero que seguro que se alegrarían y sentirían orgullosos igualmente. Mi mujer (Montse), mis hijos (Juanjo y Jorge), mis padres (Juan José y M<sup>a</sup> José), mis hermanos (Montse y Enrique), mi familia política,... este esfuerzo sé que ha sido el vuestro.

A todos los mencionados de forma explícita o implícita y a aquellos a los que por extensión no he podido mencionar, muchas gracias.



## Tabla de contenido

1.- INTRODUCCIÓN.....	13
2. LA INDUSTRIA DE LA ROCA ORNAMENTAL. ....	17
2.1 ENCUADRE GEOLÓGICO. ....	17
2.1.1 La geología de España. ....	17
2.1.2 La geología de Extremadura. ....	21
2.2 LAS ROCAS ORNAMENTALES Y SU USO EN CONSTRUCCIÓN. ....	23
2.2.1 Clasificaciones de la roca ornamental. ....	24
2.2.2 Usos de la piedra natural.....	28
2.2.3 Procesos productivos. Maquinarias y equipos.....	29
2.2.4 Puestos de trabajos u ocupaciones, relacionadas con el proceso extractivo y transformador de las rocas ornamentales. ....	35
2.3 EL GRANITO ORNAMENTAL.....	37
2.3.1 Caracterización tecnológica del granito utilizado en construcción.....	37
2.3.2 Granito Gris Quintana .....	40
2.4 IMPORTANCIA DEL SECTOR DE LAS ROCAS ORNAMENTALES.....	44
2.4.1 El Sector en cifras. ....	44
2.4.2 Las Rocas Ornamentales en España. ....	46
2.4.3 Importancia del Sector de las Rocas Ornamentales en Extremadura.....	48
2.5 LA RADIACIÓN IONIZANTE.....	50
2.5.1 Origen de la radiactividad natural.....	50
2.5.2 La radiactividad en la construcción .....	52
2.5.3 El radón.....	54
2.5.4 El Código Técnico de la Edificación (CTE). ....	56
2.5.5 Industrias NORM. ....	57
2.5.6 Radiactividad y rocas ornamentales.....	57
2.5.7 Normativa aplicable. ....	60

2.5.8	Las rocas ornamentales y las industrias NORM. ....	62
2.6	LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA. NORMATIVA.....	63
3.	CONTENIDOS RADIATIVOS DE LOS GRANITOS.....	69
3.1	CLASIFICACIÓN DE LOS GRANITOS DE EXTREMADURA.....	69
3.2	CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA DE LOS GRANITOS EXTREMEÑOS.....	72
3.2.1	Preparación de muestras. ....	72
3.2.2	Contenido de radionucleidos naturales en granitos .....	73
3.2.2.1	Análisis de resultados según la clasificación petrográfica de los granitos (diagrama QAPF) 80	
3.2.2.2	Análisis de resultados según las texturas de los granitos .....	81
3.2.2.3	Análisis de resultados según la localización del batolito.....	83
3.2.2.4	Análisis de resultados de los granitos, según el tamaño de grano de la muestra analizada 85	
3.2.3	Dosis por irradiación externa .....	87
3.2.3.1	Índice de Radio equivalente ( $R_{eq}$ ) .....	87
3.2.3.2	Determinación del Índice de concentración de actividad gamma (I).....	88
3.2.4	Radón en granitos .....	91
3.2.4.1	Medidas de control de calidad. Medidas de fondo.....	92
3.2.4.2	Determinación de las exhalaciones superficiales.....	94
3.2.4.2.1	Resultado de las determinaciones de las exhalaciones .....	95
3.2.4.2.2	Influencia de los distintos acabados sobre la exhalación de radón .....	97
3.2.4.3	Determinación de las emanaciones de radón.....	100
3.2.4.3.1	Resultado de las determinaciones de las emanaciones.....	100
4.	ANÁLISIS DE LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN A RADIACIONES IONIZANTES EN LA INDUSTRIA DEL GRANITO.....	103
4.1	INTRODUCCIÓN.....	103
4.2	TRABAJADORES DE LA INDUSTRIA DEL GRANITO .....	106
4.2.1	Irradiación externa .....	108

4.2.2 Aerosoles .....	114
4.2.3 Exposición al radón.....	121
4.2.4 Conclusión general sobre el estudio de la exposición de los trabajadores.....	131
4.3 MEDIOAMBIENTE .....	132
4.3.1 Materiales y metodología. ....	133
4.3.2 Contenido radiológico de los residuos de granito (fracción gruesa y fracción fina).....	135
4.3.3 Impacto radiológico en el agua utilizada en la industria del granito. ....	136
4.3.4 Evaluación de la biodisponibilidad de los residuos de granito (fracción gruesa y fracción fina).....	143
5. IMPACTO RADIOLÓGICO EN INDUSTRIAS CON MATERIALES RADIATIVOS DE ORIGEN NATURAL. .....	149
5.1. EVALUACIÓN DEL IMPACTO RADIOLÓGICO DE LA INDUSTRIA DEL GRANITO. ....	150
5.1.1. Objetivo y campo de aplicación .....	150
5.1.2. Niveles de referencia.....	151
5.1.3. Diseño del protocolo. ....	152
5.2 PROPUESTA DE PROTOCOLO PARA EL ESTUDIO RADIOLÓGICO DE UNA INDUSTRIA DEL GRANITO. .....	157
5.3 APLICACIÓN DEL PROTOCOLO PROPUESTO PARA LA EVALUACIÓN RADIOLÓGICA, EN LA EMPRESA SELECCIONADA PARA EL PRESENTE ESTUDIO. ....	162
6. CONCLUSIONES. ....	165
7. BIBLIOGRAFÍA .....	171



## 1.- INTRODUCCIÓN

La importancia del sector de las rocas ornamentales en Extremadura, especialmente la extracción y elaboración del granito, hace que esta actividad haya sido un sector estratégico para la economía de la región extremeña en los últimos años. El desarrollo económico y social de determinadas comarcas, está asociado al desarrollo sostenible de este sector en dichas localidades.

La compleja reglamentación en continuo desarrollo y evolución que afecta a este sector, obliga a las empresas extractoras y transformadoras de las rocas ornamentales a estar vigilantes y en incesante adaptación de sus procesos productivos, para dar cumplimiento con las exigencias normativas, tanto en materia técnica, como medioambiental y en lo relativo a la protección de la salud de sus trabajadores.

Debido a la tipología de trabajo desarrollado en las industrias de este sector, son diferentes los riesgos a los que los trabajadores están sometidos diariamente: enfermedades músculo-esqueléticas, exposición al polvo (silicosis), etc. A estos riesgos tradicionalmente conocidos, hay que añadir en los últimos años la necesidad de conocer y controlar, en algunos casos, la posible exposición de los trabajadores a niveles de radiación natural relativamente elevados.

Gracias a la creciente importancia que en la actual sociedad del bienestar adquiere la prevención en materias tales como la salud pública o la salud laboral, son diferentes las iniciativas llevadas a cabo por distintos organismos de carácter nacional e internacional, destinadas a controlar los niveles de radiación que puede recibir tanto la población general, como algunos trabajadores en particular. Estas iniciativas son recogidas en múltiples documentos a modo de normativas, reglamentaciones o recomendaciones, cuyo principal propósito es el de restringir o al menos limitar a valores razonables, la exposición a elementos radiactivos de dichos trabajadores o de la población a nivel general.

Los diferentes productos utilizados en la construcción, entre los que podemos encontrar las rocas ornamentales (como el granito), están elaborados a partir de materias primas naturales que incluyen en su estructura minerales de muy diversa naturaleza y composición, con cantidades variables de distintos radionucleidos procedentes de series radiactivas naturales (principalmente en los radionucleidos procedentes de las series del  $^{238}\text{U}$  y del  $^{232}\text{Th}$ , además del  $^{40}\text{K}$ ). El desarrollo de nuevas normativas y reglamentaciones destinadas a conocer y limitar el contenido radiológico de los materiales que rodean a la población, obliga en el caso de los materiales utilizados en la construcción, a conocer las concentraciones de los radionucleidos presentes en ellos, con el fin de adoptar medidas, en el caso de ser necesarias, que permitan evitar un incremento significativo del fondo natural radiactivo y de la dosis absorbida por las personas que habitan en dichos ambientes. Estas nuevas disposiciones pueden conllevar en algunos casos y por este motivo, a la restricción en el uso de ciertos materiales de construcción, pudiendo suponer con ello importantes consecuencias económicas, ambientales y sociales.

Por otra parte, inicialmente las empresas del sector de las rocas ornamentales deberían estar sujetas a una normativa específica de aplicación sobre las industrias denominadas NORM (del inglés, Naturally Occurring Radioactive Materials), véase R. D. 1439/2010 que modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes, aprobado por R. D.783/2001. El motivo es la presencia en las mismas de materias primas que contienen radionucleidos naturales, a veces en concentraciones calificables de importantes. Además, durante el proceso productivo, se podría llegar

a potenciar la concentración de dichos radionucleidos en parte de sus componentes, elementos y áreas de la instalación, así como en algunos de los productos, subproductos y sustancias de desecho generadas. Estas situaciones pueden suponer un incremento no despreciable de la exposición radiológica de los trabajadores en contacto directo con estos materiales o incluso del público en general del entorno industrial, a través de los vertidos rutinarios de estas industrias. Para conocer el potencial incremento de la exposición a los trabajadores y al público, es preciso que se realicen estudios encaminados a evaluar las dosis potenciales efectivas que recibirían los mencionados grupos poblacionales, como consecuencia del impacto radiológico ocasionado por la instalación objeto de estudio. Un listado no exhaustivo de industrias en las que se utilizan materiales NORM, aparece en el Anexo VI de la Directiva 2013/59/EURATOM (CE, 2014) y definido en su Artículo 23. En esta Directiva, se insta a los Estados Miembros a que se identifiquen los sectores industriales que utilizan materiales radiactivos de origen natural, en los que se pueda producir una exposición de los trabajadores o de los miembros de la población, que no deba considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.

Es por tanto de gran interés, analizar el grado de exposición de los trabajadores (y el público en general) a los radionucleidos de origen natural, durante los trabajos rutinarios de extracción y transformación del granito, así como el impacto radiológico que dichas actividades pueda generar sobre su entorno. Sin embargo, a pesar de la implicación directa que determinadas normas o reglamentos en materia de protección radiológica podrían tener sobre el desarrollo de la actividad en algunas de las empresas del sector de la roca ornamental, el grado de aplicación de esta normativa, debido a la falta de estudios o trabajos en este sentido con los que cuenta el sector, hace que su aplicación y cumplimiento sea muy limitado, cuando no simplemente nulo.

Este bajo nivel de implantación en materia de protección radiológica, puede colocar a las empresas extractoras y transformadoras de rocas ornamentales, ante una situación difícil desde una doble vertiente:

- El desconocimiento de determinados parámetros o contenidos radiológicos, puede situar tanto a los trabajadores como al público en general, ante un riesgo de exposición radiológica no controlado. Además, puede situar a las empresas en una situación delicada a la hora de dar cumplimiento con determinados requerimientos normativos para el uso de sus productos.
- La falta de información y de trabajos fiables, coloca a las empresas del sector a merced de una posible guerra comercial a emprender por otros sectores con un mayor grado de desarrollo en los estudios sobre esta materia.

Existe por tanto, una necesidad manifiesta por parte del sector de las rocas ornamentales, de avanzar en materia de protección radiológica, para de esta forma poder dar respuesta a la demanda y a la posible presión, que previsiblemente cada vez se ejercerá con mayor intensidad sobre esta materia.

El desarrollo de esta Tesis Doctoral pretende contribuir a incrementar el conocimiento radiológico de las rocas ornamentales de Extremadura (concretamente de los granitos), así como de las posibles implicaciones radiológicas-dosimétricas que la extracción y el tratamiento industrial de esta materia prima pudiera tener, para de esta forma poder posicionarse y marcar estrategias de futuro en un sector tan importante para la economía regional como éste.

Dos son los objetivos generales perseguidos por este trabajo.

En primer lugar, enmarcar las características radiológicas de los granitos originarios de Extremadura. Estas determinaciones permitirán conocer las posibles limitaciones, que de existir, podrían tener algunos granitos al ser utilizados como productos de construcción. Esta clasificación se llevará a cabo en base al valor que cada uno de dichos materiales estudiados predigan para el índice I, en sus dos modalidades de uso en la edificación: de forma masiva o limitada. La conclusión que se obtendrá de la consecución de este objetivo, permitirá contribuir a la definición de los posibles usos de cada uno de dichos granitos, guiando no sólo las futuras inversiones a realizar al respecto en sus respectivas empresas productoras y facilitando incluso su eventual comercio al menos a nivel de mercado europeo.

En segundo lugar, establecer basado en el estudio exhaustivo de una empresa extractora/transformadora de granito, una valoración precisa de todas las vías de exposición de los trabajadores (irradiación externa, inhalación de aerosoles, exposición a radón) debido a su actividad diaria, así como al impacto producido por los residuos generados durante los citados procesos rutinarios y que afectan a dichos trabajadores, al entorno de dicha industria y eventualmente al público presente en el mismo. Con el análisis de todos estos valores se podrá determinar en particular, si la actividad laboral minero-industrial de la extracción y transformación del granito concretamente analizada, puede quedar exenta de la necesidad de efectuar algún tipo de control radiológico, o si por el contrario se deben establecerse algún tipo de medidas de vigilancia, control, remediación o seguimiento. Por otra parte y de forma general, permitirá establecer los criterios a seguir para llevar a cabo una eficaz valoración radiológica de la exposición a la radiación natural de los trabajadores de las industrias del granito en general. En base a dichos criterios se propone elaborar un posible protocolo de valoración del impacto radiológico, que permita fácilmente a los empresarios del sector dar cumplimiento a lo establecido en el R. D. 1439/2010, que modifica al R. D. 783/2001 sobre la protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes. Para la definición del citado protocolo se han tenido en cuenta las recomendaciones de la Guía de Seguridad GS-11.03 (CSN, 2012), con el fin de establecer en su caso las medidas de remedio, vigilancia y control a diseñar, teniendo en cuenta el principio ALARA (norma básica de seguridad, "tan bajo como sea razonablemente alcanzable").



## 2. LA INDUSTRIA DE LA ROCA ORNAMENTAL.

### 2.1 ENCUADRE GEOLÓGICO.

La distribución de la gran cantidad de variedades comerciales de rocas ornamentales existentes en la actualidad en todo el mundo, son el reflejo de la geología presente en las distintas regiones de extracción. Junto a este decisivo condicionante geológico, existen otra serie de factores socioeconómicos, ambientales, técnicos y tecnológicos, que son los que finalmente limitan la apertura de una cantera o no y por tanto la puesta en los mercados de una nueva variedad comercial.

La geología de la Península Ibérica es por tanto condicionante principal que rige la distribución de las diferentes variedades comerciales de rocas ornamentales, haciendo que exista una clara localización de las diferentes variedades comerciales de Piedras Naturales a lo largo de la misma. Es por ello que los materiales ígneos y metamórficos (los más antiguos) se encuentran en el oeste peninsular (granitos y pizarras), teniendo como referente de ello a las Comunidades de Galicia y Extremadura. Por el contrario, la zona del este peninsular es donde se encuentran los materiales carbonatados (calizas y mármoles), destacando las zonas de Alicante, Murcia o Almería (Figura 2.1)

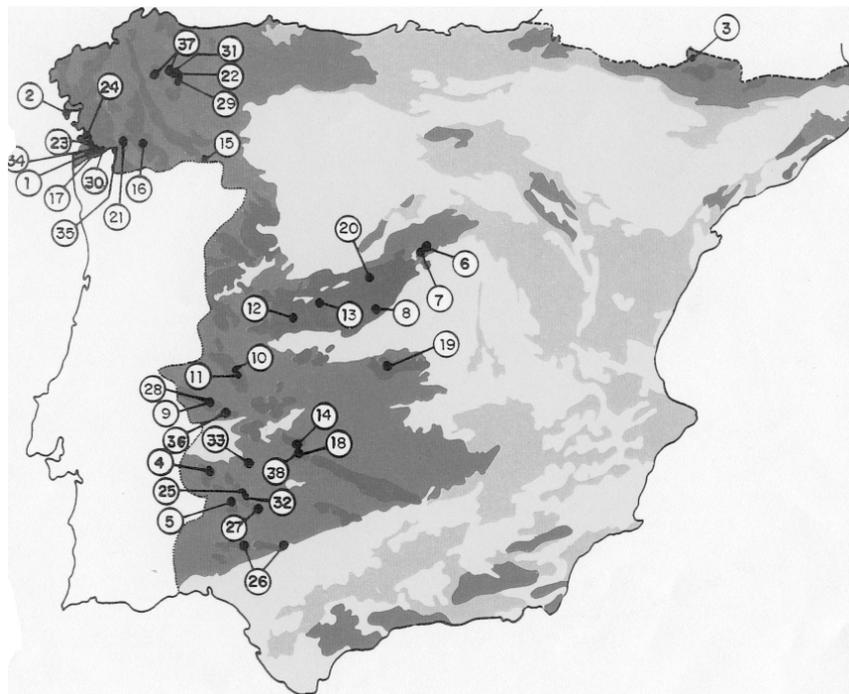


Figura 2.1: Principales zonas productoras de granito en España (IGME, 1985).

#### 2.1.1 La geología de España.

La variada geología que presenta en la actualidad la Península Ibérica, es reflejo de la compleja evolución geológica que nuestro planeta ha sufrido a lo largo de sus aproximadamente 4.500 millones de años de historia. En su evolución, la tierra ha sufrido numerosos episodios orogénicos



aunque sus rocas se formaron con posterioridad a la actividad tectónica, y no presentan deformación ni metamorfismo, están relacionadas con el ciclo orogénico alpino.

- Materiales mesozoicos, cenozoicos y cuaternarios de plataforma. Se trata de los materiales más jóvenes de la Península Ibérica. Son rocas sedimentarias, de composición diversa, no afectadas por el ciclo alpino, que en general se depositaron rellenando las depresiones topográficas (cuencas) originadas en épocas anteriores. Estos materiales guardan una relación de zócalo-cobertera con las rocas de los dominios varisco y alpino. Sus principales afloramientos se extienden formando un gran triángulo que cubre parte de las cuencas del Ebro, Duero, Tajo y Guadalquivir.

### El Macizo Ibérico o Hespérico

Limitando este apartado de la geología de la Península Ibérica, a la zona más representativa de la geología peninsular y de acuerdo a los objetivos marcados en este trabajo, centraremos este estudio sobre el Macizo Ibérico o Hespérico (Pérez-Estaún, 2004)

La unidad geológica denominada Macizo Hespérico (Figura 2.3), es uno de los segmentos preservados parcialmente de la antigua Cordillera Hercínica Europea, resultante, en la Península Ibérica de la Orogenia Varisca (también conocida como Orogenia Hercínica). Constituida por los materiales más antiguos de la península (de edad Precámbrico y Paleozoico), fueron generados o afectados durante la orogenia hercínica y se caracterizan por la presencia de rocas de diferente génesis, que afloran junto con la intrusión de frecuentes plutones de rocas ígneas, encontrándose en parte recubiertos por materiales más recientes.

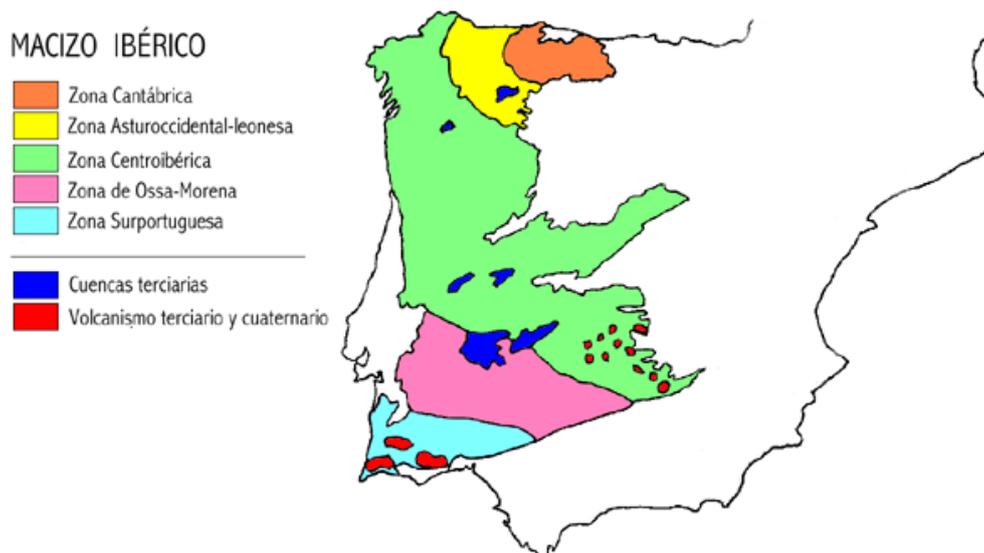


Figura 2.3. Zonificación del macizo Hespérico (Julivert et al, 1972).

La estructura del macizo presenta cierta simetría o bilateralidad. Se distinguen grandes bandas NO-SE que siguen el trazado de las principales estructuras hercínicas. El macizo hespérico aparece dividido

en 5 zonas o bandas paralelas de orientación general NO-SE, que representan distintos dominios estructurales con grados de deformación diferentes (Julivert et al, 1972).

De forma resumida estas zonas son:

- **Zona Cantábrica:** presenta la serie estratigráfica más completa, con sedimentos que abarcan desde el Precámbrico superior hasta el Pérmico. Estos materiales son en su mayor parte rocas sedimentarias de aguas poco profundas, despegados del sustrato Precámbrico, que se fueron plegando y fracturando, formando las series de pliegues y cabalgamientos (tectónica epidérmica) característicos de esta zona. Se trata de una deformación que sólo afecta a la parte más superficial de la corteza y que se caracteriza por la falta de metamorfismo y magmatismo.
- **Zona Astur-Occidental-Leonesa:** en esta zona afloran materiales precámbricos, cámbricos, ordovícicos y silúricos. Hay un gran desarrollo de los sedimentos del Paleozoico inferior en facies profunda, pero una casi total ausencia de sedimentos del Paleozoico superior. Presenta grandes pliegues y cabalgamientos y a diferencia de la zona anterior, aquí la deformación ha estado acompañada de metamorfismo generalizado que afecta a todas las rocas que afloran en la zona. Los granitoides son escasos en la parte oriental, mientras que en la occidental son más abundantes.
- **Zona Centro-Ibérica:** es la más extensa y heterogénea de las que constituyen el Macizo Hespérico. Su principal característica es la abundancia de granitoides (granitos y rocas plutónicas afines), que son anteriores y posteriores a la orogenia hercínica, con edades comprendidas entre los 500 y los 280 Ma. Otra de las características destacables es la heterogeneidad del metamorfismo presente, ya que coexisten áreas con metamorfismo de alto grado, con otras sin metamorfismo. En su extremo noroccidental, en Galicia y norte de Portugal, existen grandes extensiones de rocas ultrabásicas cuyo origen, muy profundo, se sitúa en el manto terrestre. Son los denominados complejos catazonales de Galicia y Tras-os-Montes. En el resto de la zona predominan rocas precámbricas y cámbricas que constituyen el zócalo sobre el que se depositaron el resto de las rocas paleozoicas. En relación con los plutones graníticos y sus cortejos filonianos aparecen importantes yacimientos metálicos.
- **Zona de Ossa-Morena:** se caracteriza por la gran extensión de los afloramientos del Precámbrico y Cámbrico, por un metamorfismo generalizado y por el notable desarrollo de cuerpos intrusivos (incluyendo rocas básicas) y vulcanismo, así como por las intensas deformaciones (plegamientos y cabalgamientos), que son principalmente del Carbonífero inferior.
- **Zona Sur-portuguesa:** es la zona más meridional de las que componen el Macizo Hespérico, ocupando la esquina suroccidental de la Península. Está constituida por materiales paleozoicos de litología mucho menos variada que los de las zonas anteriores, entre los que destaca una alternancia rítmica muy potente de cuarcitas y pizarras con metamorfismo de grado bajo. Son por lo general sedimentos marinos profundos del Silúrico-Carbonífero inferior, con abundantes materiales volcánicos (lavas y rocas piroclásticas) intercalados, que han dado origen a importantes yacimientos minerales.

La región de Extremadura se encuentra enclavada dentro de la zona Centroibérica y la Zona de Ossa Morena.

### **2.1.2 La geología de Extremadura.**

Los recursos minerales presentes en la Comunidad de Extremadura, los diferentes tipos de rocas y los yacimientos asociados a ellas, son la consecuencia directa de la evolución geológica de la Región. Todo ello constituye el principal condicionante de una importante actividad económica asociada a la minería, especialmente a la industria extractiva y de elaboración de las Rocas Ornamentales, cuya explotación contribuye de forma importante a la economía de la región.

En la Región Extremeña afloran materiales de muy diversa naturaleza (sedimentaria, metamórfica e ígnea) y un amplio abanico de edades, ya que aparecen rocas del Neoproterozoico (de más de 540 millones de años), del Paleozoico (de 280 a 540 m.a.), del Neógeno (23 millones de años) y depósitos recientes (Cuaternario), presentes en las cuencas de los ríos Tajo y Guadiana.

En Extremadura afloran rocas plutónicas y subvolcánicas de diferentes edades. Destacan cuatro grandes grupos de rocas intrusivas, dependiendo de su relación con los dos ciclos orogénicos antes mencionados:

1. Rocas ígneas precámbricas, anteriores o relacionadas con el ciclo orogénico finiprecámbrico. Se trata de gabros y serpentinas, minoritarios, y granitos s.s. (sensu stricto), ampliamente representados.
2. Rocas ígneas prehercínicas. Aparecen en plutones emplazados durante el Paleozoico, antes del Devónico Medio en que comienza el ciclo hercínico. Son rocas muy deformadas, constituidas por un grupo heterogéneo de granitos.
3. Rocas ígneas hercínicas que intruyeron entre el Devónico Superior y el Pérmico Inferior. Es el grupo más heterogéneo, posee amplia variedad composicional (de gabros a granitos s.s.) y carecen de carácter orogénico.
4. Rocas ígneas posthercínicas. Son rocas básicas que afloran de forma local y constituyen el relleno de los diques mesozoicos, como el asociado a la falla de Plasencia, de dirección NE-SO, relacionados con la apertura del Océano Atlántico.

La mayor parte de las rocas precámbricas y paleozoicas aflorantes se presentan en condiciones de metamorfismo de grado muy bajo o incluso anquimetamórficas. Únicamente en la ZCBC (zona de Cizalla Badajoz Córdoba) y en las aureolas de metamorfismo de contacto que rodean a la mayor parte de los plutones graníticos, se encuentran asociados minerales "testigos" de condiciones de metamorfismo más altas.

Las rocas de medio y alto grado se formaron en el proceso dinamotérmico que acompañó a la orogenia finiprecámbrica, mientras que durante el ciclo hercínico el metamorfismo fue muy débil o inexistente.

Desde el punto de vista estructural, se distinguen 3 zonas:

1. La zona septentrional, caracterizada por la existencia de amplias áreas anticlinoriales (donde afloran las series precámbricas), entre las que se localizan estrechos sinclinatorios, en los que afloran las series paleozoicas. Dichas estructuras aparecen cortadas por numerosos plutones graníticos. Todo ello es el resultado de la superposición de dos fases de deformación durante el ciclo hercínico.
2. La zona intermedia, que coincide aproximadamente con la zona de cizalla Badajoz-Córdoba e incluye una banda que representa la zona marginal del área norte.
3. La zona meridional, que presenta una estructura compartimentada por zonas de cizalla bastante espaciadas, permitiendo la observación de los rasgos de la estructura hercínica y, de forma local, de la precámbrica.

Dentro de la Península Ibérica, Extremadura es el área en la que existen las mayores y mejores evidencias para caracterizar el ciclo orogénico Cadomiense o Pan-Africano (entre el Riftense superior y el Vendense inferior). Este ciclo corresponde a una orogenia de tipo alpino, mediante el cierre de una cuenca oceánica y la posterior colisión de las masas continentales que la bordeaban.

Debido a su singular geología, Extremadura ha sido desde tiempos pretéritos para sus moradores y los pueblos limítrofes, una zona estratégica para la extracción y suministro de sus recursos mineros que pueden ser agrupados del siguiente modo:

- Minerales metálicos: destacando por su interés económico y estratégico, el oro, la plata, zinc, estaño o el wolframio, entre otros.
- Minerales gemológicos: entre ellos el cuarzo rosa, turquesa, etc.
- Minerales energéticos: principalmente minerales de uranio.
- Minerales industriales: de muy diversa composición como barita, arcillas, feldespato, fosfatos, etc.
- Rocas industriales: principalmente áridos para la construcción, calizas para la fabricación de cemento.
- Aguas minerales y termales.
- Rocas ornamentales: destacando por su importancia el granito, pero sin olvidar la importancia de las pizarras y en menor medida los mármoles (aunque de gran importancia en épocas romanas para la ornamentación de Mérida).

Debido a la evolución de los mercados y a la aparición de nuevas reservas en diferentes lugares del mudo, en los últimos años la actividad minera en Extremadura se ha centrado, principalmente, en la explotación de áridos para la construcción y en la extracción de rocas ornamentales.

Asociadas a esta actividad extractiva, adquiere una gran importancia la actividad relacionada con el beneficio de estos materiales: plantas asfálticas, plantas de hormigón, plantas de transformación de rocas ornamentales, etc.

La importancia de las Rocas Ornamentales radica además en la importante capacidad exportadora que tienen las empresas del Sector, lo que ha contribuido durante muchos años a equilibrar la balanza económica extremeña en términos de importación-exportación.

## **2.2 LAS ROCAS ORNAMENTALES Y SU USO EN CONSTRUCCIÓN.**

La piedra natural es un producto industrial, que después de un proceso de elaboración, es apto para ser utilizado como material noble de construcción, conservando íntegramente su composición, textura y características fisicoquímicas.

La piedra natural es el elemento de construcción por excelencia, utilizado desde épocas pretéritas por sus características tanto técnicas como estéticas. En la actualidad, la utilización de la piedra en la construcción (obra civil y edificación) compite con la presencia de otros materiales (principalmente hormigón, cerámicos, maderas, asfalto, vidrios, etc.) que aportan otras cualidades técnicas y de puesta en obra, pero que sin embargo tiene difícil competir con la piedra en la diversidad de aspectos que puede presentar y que constituye una inagotable fuente de posibilidades expresivas, que confieren un importante valor añadido a cualquier obra realizada con piedra natural.

Son múltiples las características y propiedades que la piedra natural puede aportar en cada una de las obras en las que es utilizada, pero todas ellas pueden agruparse en tres valores principales: su calidad, durabilidad y elegancia.

- La calidad de los productos de piedra natural: asegurada además de por las excelentes características físico-mecánicas de la materia prima, por el afianzamiento de un tejido transformador cada vez más profesionalizado y tecnológico, capaz de servir a los mercados productos de piedra natural, según los cánones de calidad exigibles y cumpliendo con la reglamentación vigente (marcado CE).
- La durabilidad del material pétreo: basada en un conocimiento previo del material, permite a los productos de piedra envejecer de forma lenta y ennoblecida, ofreciendo una buena resistencia a usos intensivos y a la intemperie.
- La elegancia de la piedra: definida por su expresividad, gracias a la diversidad de texturas, colores y acabados, que permite ser un material destacable por sí mismo, o fusionarse con la naturaleza de la que proviene, cumpliendo con las exigencias de coherencia estética de su entorno.

Existe una tipología de piedra, específica para cada uso y el éxito en la utilización de un material, pasa por el conocimiento del mismo, las solicitaciones a las que va a estar sometido y las condiciones de su entorno. No existe una "mala piedra", sino un uso inadecuado de la misma, el acierto en la elección de un material pétreo pasa por su conocimiento previo (características técnicas) y su adecuación de uso (dimensionamiento adecuado, colocación, mantenimiento, etc.).

El uso de la piedra natural cuenta con una gran tradición y su consolidación como material constructivo de referencia, se ha visto favorecido en los últimos años por la mejora en las técnicas de transformación (cortes y acabados) y en las técnicas de colocación.

### **2.2.1 Clasificaciones de la roca ornamental.**

Un aspecto importante a la hora de hablar de piedras naturales o de rocas ornamentales, es que la clasificación geológica o litológica (científica) no coincide con la clasificación comercial que de ellas se hace. El desconocimiento de ambas clasificaciones origina un gran número de malos entendidos, entre los diferentes agentes intervinientes en el proceso constructivo, que finalizan en la mayoría de las ocasiones en pleitos e importantes disputas económicas.

La comercialización internacional de la piedra natural, ha introducido un gran número de nombres para designar las diferentes variedades de piedra, la mayoría de ellos son nombres tradicionales y suelen reflejar el color característico y/u otras características naturales, así como el color de origen de la piedra, aunque esto no siempre sea así. A veces, el nombre de la variedad incluye términos relacionado con la clasificación geológica de la roca (tales como granito, mármol, cuarcita, etc.) que pueden o no coincidir con el nombre petrográfico preciso de la misma.

A la hora de realizar una correcta denominación de la piedra natural, se debe de declarar la denominación comercial y petrográfica de la piedra, así como su color típico y su lugar de origen, de acuerdo con las normas UNE EN 12407:2000. "Métodos de ensayo para piedra natural. Estudio petrográfico", UNE EN 12440:2000. "Métodos de ensayo para piedra natural. Denominación de la piedra natural" y UNE EN 12670: 2001. "Métodos de ensayo para piedra natural. Terminología".

Por este motivo, es importante conocer previamente a qué tipo de clasificación hacemos referencia cuando hablamos de estos materiales:

1. **Clasificación Comercial de las piedras naturales:** no hacen referencia a ningún aspecto geológico, basándose más en sus características estéticas o texturales:
  - a. Granitos: se agrupan bajo este nombre comercial a toda roca de aspecto macrocristalino, textura granuda, compacta y que permitan su pulido por dispositivos mecánicos. Compuestas por minerales con dureza comprendida entre 5 y 7 dentro de la escala Mohs de dureza (cuarzo, feldespato, etc.).
  - b. Mármoles: incluyen a todas aquellas rocas constituidas fundamentalmente (aunque no exclusivamente) por minerales carbonatados, como la calcita o la dolomita. De igual modo que en el caso anterior, permiten su pulido por dispositivos mecánicos y los minerales que las componen tienen una dureza comprendida entre 3 y 4 dentro de la escala de Mohs.

- c. Pizarras: engloban a todas aquellas rocas, exfoliables en láminas lisas y rígidas muy resistentes e impermeables
- d. Otras rocas: rocas de muy diferente composición y origen no englobadas en los apartados anteriores.

2. **Clasificación Científica de las piedras naturales:** incluye el nombre científico de la familia petrográfica de la roca, según su proceso genético (Figura 2.4), obtenido de acuerdo con el apartado 3.2 de la Norma EN 12670:2001. Si la roca no aparece incluida en las clasificaciones del apartado 3.2 de la Norma EN 12670:2001, se debe utilizar un término científico adecuado.

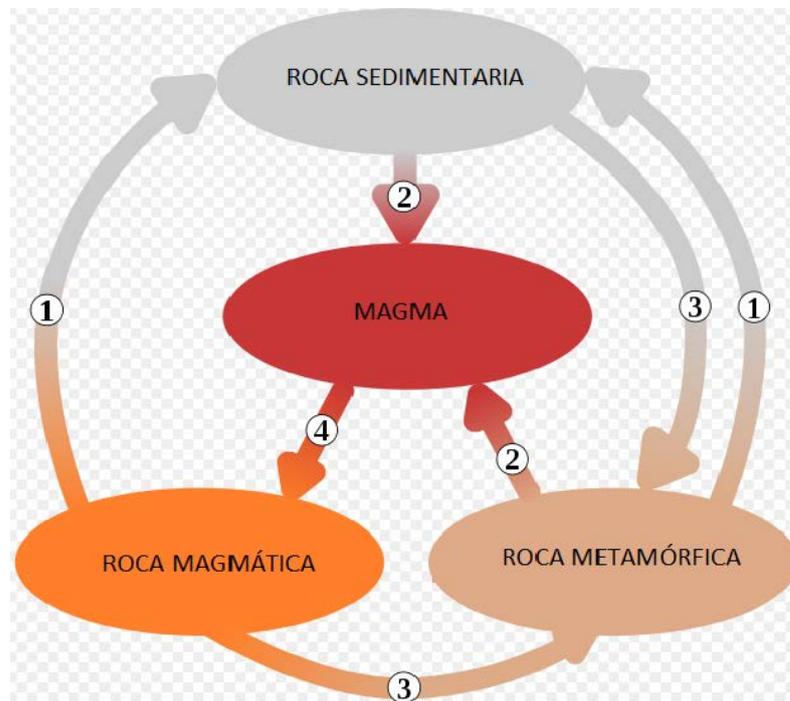


Figura 2.4: ciclo de la formación de las rocas, extraído de Wikipedia.org. (1: Erosión, transporte, sedimentación; 2: fusión; 3: metamorfismo; 4: solidificación)

- a. Granito: es una roca ígnea plutónica de composición ácida, formada por la solidificación lenta y a muy alta presión de un magma con alto contenido en sílice. La clasificación de las rocas ígneas se realiza utilizando el triángulo doble de Streckeisen o "QAPF" (ver Figura 2.5), que permite de una manera fácil clasificar las rocas plutónicas y volcánicas, a partir del contenido modal en cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa y feldespatoideos.
- b. Mármol: es una roca metamórfica compacta formada a partir de la recristalización de rocas carbonatadas, que sometidas a elevadas temperaturas y presiones, alcanzan un alto grado de cristalización.
- c. Pizarra: es una roca metamórfica homogénea formada por la compactación de minerales arcillosos.

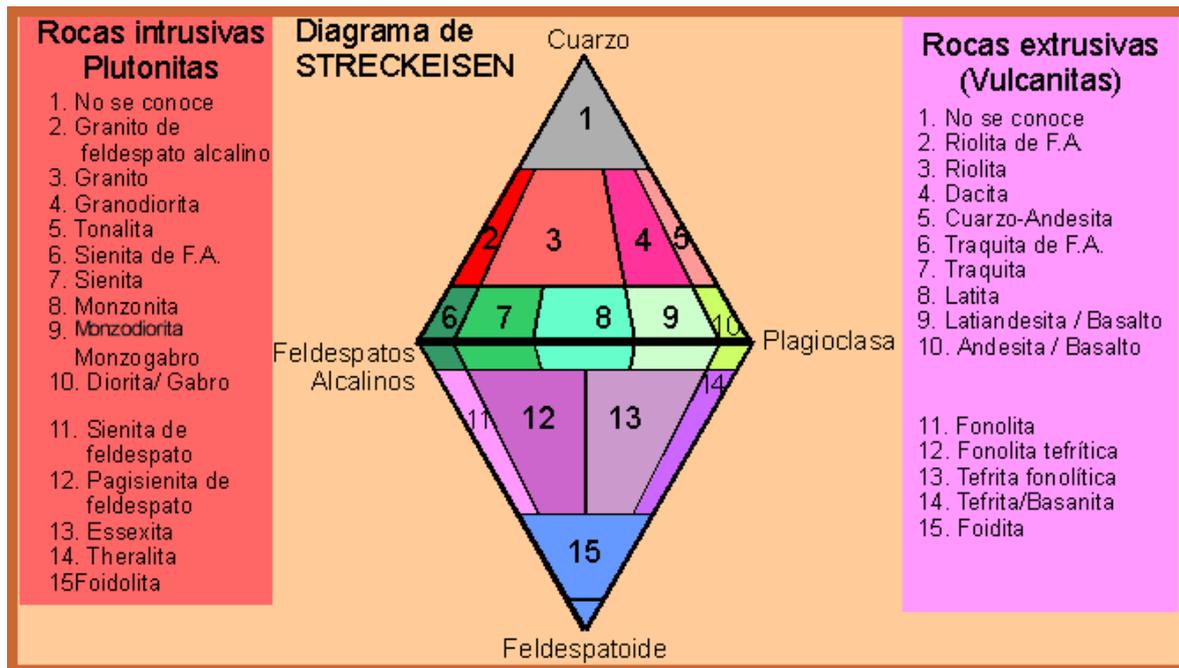


Figura 2.5: diagrama Streckeisen (QAPF) para clasificación de rocas ígneas (Streckeisen, 1974).

En función de las características petrológicas, en la industria de la roca ornamental, se pueden definir diferentes tipos de granitos, de entre los cuales destacan las siguientes tipologías

- Granitos y Granodioritas: Son el grupo más abundante dentro de los granitos ornamentales. Esto se debe a su abundancia en la corteza terrestre y a las buenas condiciones de afloramiento que permiten desarrollar grandes explotaciones con importantes reservas de material. Son muy variados en cuanto a color y textura, aunque suelen presentar tipos de grano grueso y porfídico.
- Tonalitas, monzonitas y cuarzodioritas: Grupo bien representado entre los granitos ornamentales, ya que por su composición mineralógica, constituida en cierta proporción por minerales ferromagnesianos de color oscuro, dan lugar a tonalidades oscuras de gran interés. Suelen ser rocas compactas, de tamaño de grano variable y fracturación irregular. Suelen tener buen comportamiento frente al pulido y se pueden utilizar tanto en elementos internos como externos, obteniéndose en general, en forma de bloques de tamaño grande a mediano, en frentes de cantera de gran longitud.
- Dioritas y Gabros: Es un grupo de roca característico, denominado genéricamente como “granitos” negros, en relación al color de los minerales que lo constituyen y con un conjunto de aplicaciones muy específico (mercado funerario). Sus yacimientos se concentran, fundamentalmente, en Extremadura.

A modo de síntesis, en la Tabla 2.1 aparece un cuadro resumen conteniendo las denominaciones tanto comerciales como científicas más usuales y su correlación.

COMERCIAL			CIENTÍFICA			
Textura		Composicional	Rocas ígneas		Rocas metamórficas	Rocas sedimentarias
<b>Granito</b>	Granito claro	Rocas silíceas	Granito		Gneis	
			Grandiorita			
			Pegmatita			
Granito negro			Gabro			
			Monzonita			
			Tonalita			
		Dolerita				
	Peridotita					
	Basalto		Andesita			
			Basalto			
<b>Pizarra</b>				Esquistos		
				Filitas		
				Pizarras		
<b>Mármol</b>	Rocas Verdes	Rocas carbonatadas		Serpentinitas		
				Anfibolitas		
	Mármoles				Mármol	
	Calizas					Calizas
	Travertinos				Dolomías	
<b>Otras rocas</b>	Arenisca	Otras composiciones				Areniscas
	Alabastro					Yeso
	Pumita			Ignimbritas		
				Tobas		
	Cuarcita		Pumitas			
				Cuarcita		

Tabla 2.1: correlación entre las clasificaciones de las rocas ornamentales (elaboración propia).

### **2.2.2 Usos de la piedra natural.**

Los usos en construcción de la roca ornamental son variados y cada vez más extendidos, gracias a las excelentes características de los elementos elaborados a partir de esta materia prima y a la reducción del precio final de los productos de piedra natural, debido por un lado a la reducción de costes imputables al proceso productivo y por otro lado a la aparición en los mercados nacionales e internacionales de materiales procedentes de un mayor número de países productores.

La amplia oferta de rocas ornamentales transformadas en piezas de variadas dimensiones, espesores y acabados, cubre las necesidades de usos en el sector de la construcción, tanto de fachadas e interiores de nuevas edificaciones, de rehabilitaciones o de decoraciones de locales, como de mobiliario urbano.

Los principales usos que en construcción se hacen de la piedra natural, son los siguientes:

- **Revestimientos o aplacados:** las placas dimensionadas procedentes del corte de las tablas, suelen destinarse a cubrir paramentos verticales u horizontales. Los aplacados para revestimientos cumplen una función estética y otra tecnológica, que suele ser la de aislante, al haberse perdido la de tipo estructural que aportaban las mamposterías tradicionales, a las que en gran medida han sustituido.
- **Muros de mampostería:** en las obras realizadas con mampostería, la piedra no solamente tiene una misión decorativa o aislante como ocurre en los aplacados, sino que realiza una función estructural o portante.
- **Pavimentos o solerías:** uno de los usos más tradicionales es la utilización de la piedra en la construcción de pavimentos. Es un tipo de aplicación importante, y existen distintos tipos de pavimentos, en función del uso al que vayan destinados.
- **Cubiertas o tejados:** realizadas principalmente con placas de pizarra planas y de grosores de 2-6 mm. Una cubierta de pizarra para que cumpla su función, debe de constituir una superficie impermeable.

Además de los usos anteriormente mencionados para construcción, existe un intenso comercio, especialmente en el granito, en el denominado arte funerario, entendiéndose por ello cualquier obra que forma parte o está ubicada en un repositorio fúnebre (lápidas, panteones, accesorios, etc.).

La selección de un tipo de material u otro, así como de las distintas variedades existentes, depende, además de por sus propiedades estéticas, por sus características físicas y funcionales. Así, los mármoles son utilizados tanto en la elaboración de motivos esculturales u ornamentales, como en la arquitectura (revestimientos y pavimentos, especialmente en interiores). Por su parte, debido a las especiales y buenas características del granito, más del 50% de la producción de esta variedad de roca ornamental es utilizada como solución en exteriores, donde las condiciones de uso son las más exigentes: paramentos o aplacados, revestimientos, solerías y cubiertas. La ornamentación y realce suntuario, en los que predominan principalmente criterios estéticos, suponen en el caso de los

granitos el 15% de sus ventas. Otro gran nicho de mercado para estos materiales lo constituye el arte funerario, en el que predominan los criterios estéticos y que suponen el 15% del mercado del granito. Finalmente, los elementos complementarios de la construcción residencial e interiorismo, así como el mobiliario urbano, suponen un 10% del mercado del granito.

### **2.2.3 Procesos productivos. Maquinarias y equipos.**

Hay que tener en cuenta que las diferentes características físico-mecánicas y físico-químicas que presentan los distintos tipos de rocas ornamentales (granitos, mármoles y pizarras), condicionan su comportamiento y por tanto su sistema de extracción y transformación.

Por este motivo, las técnicas y los equipos utilizados durante las diferentes fases o etapas del proceso productivo, son completamente distintos, dependiendo de la naturaleza del material explotado, aunque en ocasiones puedan existir ciertas similitudes.

Los mármoles son procesados con herramientas con menor carga abrasiva. El caso de la pizarra es muy particular, puesto que el procesado final para la obtención de la teja, en la actualidad se sigue realizando de forma manual y los bloques extraídos en cantera (“rachones”) son de menor tamaño. Los granitos son extraídos y transformados con herramientas adaptadas a una mayor dureza y abrasividad.

Debido a la orientación de este trabajo, en este apartado nos centraremos en el estudio del proceso extractivo y transformador del granito. En líneas generales, los principales procesos que intervienen en esta actividad son los siguientes (figura 2.6):

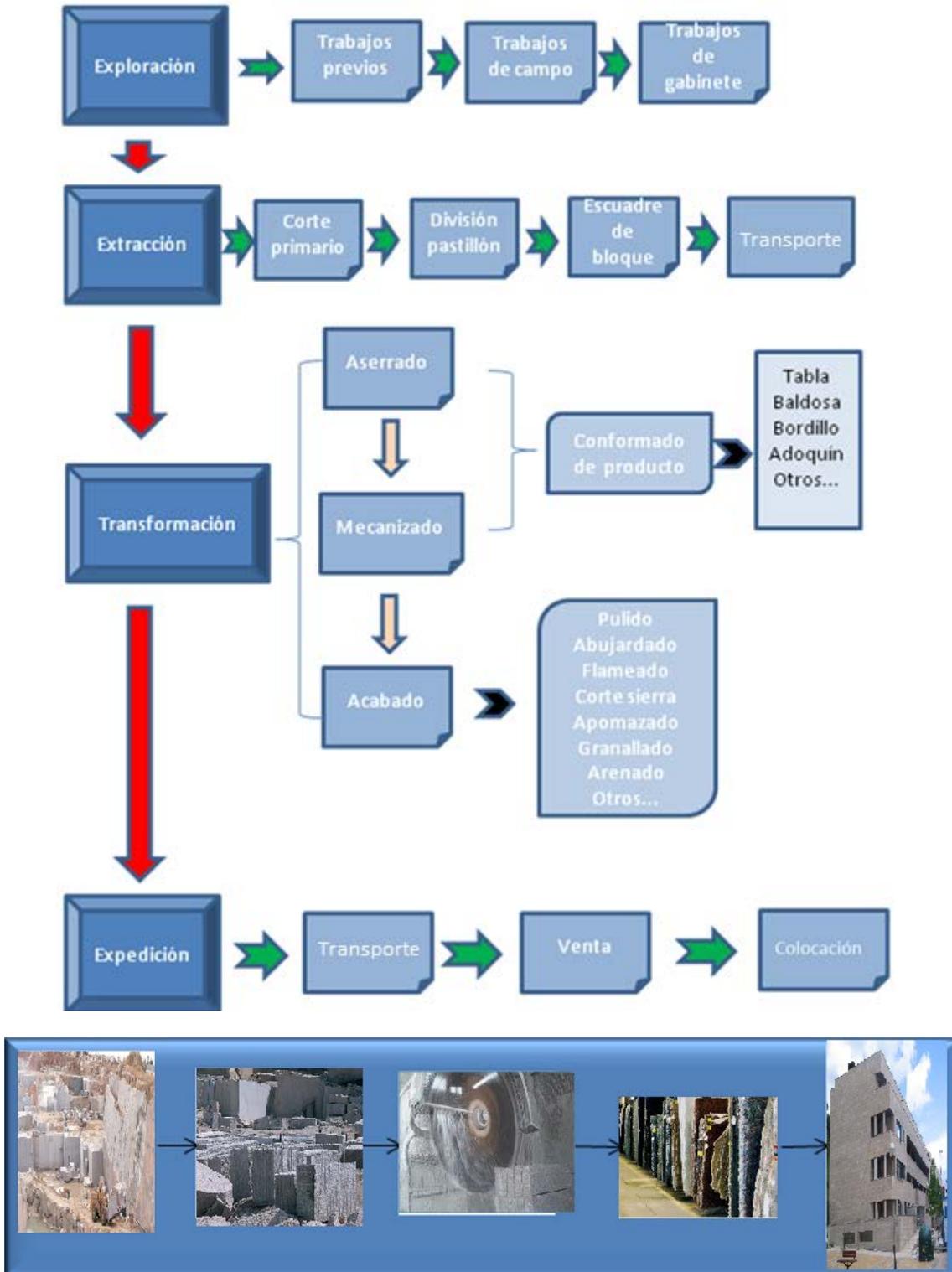


Figura 2.6: esquema básico de los procesos productivos (elaboración propia).

En el último siglo se han producido grandes avances en la extracción y elaboración de rocas ornamentales o piedra natural, gracias al desarrollo de herramientas diamantadas adaptadas a las necesidades del sector y ajustadas a las características de los materiales elaborados.

**El proceso de extracción.** El proceso extractivo es el conjunto de actividades llevadas a cabo en la cantera, destinadas a la obtención de material pétreo en condiciones de ser elaborado posteriormente en las plantas transformadoras. El proceso de extracción del granito es una labor minera a cielo abierto.

El granito se extrae, siempre que las condiciones lo permitan, en bloques con tamaño comercial regular de aproximadamente 3,0 x 1,5 x 1,5 metros; lo que supone un volumen aproximado 7 m<sup>3</sup> y unas 20 toneladas de peso. Son las medidas que pueden ser transportadas por carretera y que posteriormente se pueden manejar en los telares y máquinas que transformarán estos bloques en piezas u objetos de piedra natural.

La principal herramienta utilizada en la actualidad en las canteras de granito, es el hilo diamantado; que permite cortar la roca a una buena velocidad, sin que se dañe el bloque de piedra y desperdiciando poco material en el corte (el diámetro del hilo es aproximadamente de 5mm). Los hilos diamantados en el mercado son de diferente tipo, dependiendo de las exigencias a las que van a estar sometidos.

Las herramientas de hilo diamantado está presente en todo el proceso tanto extractor (corte en frente de cantera, escuadre de bloque) como en el transformador (corte de tabla, moldura, etc.).

Para la extracción de los bloques de granito con las dimensiones adecuadas para su transformación, primero hay que crear un frente de cantera normalmente realizando grandes voladuras y utilizando maquinas habituales en las actividades extractivas, como las excavadoras con martillo perforador acoplado, retroexcavadoras, perforadoras múltiples para barrenar, palas cargadoras de ruedas, dumpers para transportar el material, etc. Los frentes son paredes verticales, de 4-6 m de altura y desarrollo longitudinal de 10-50 m, cortados en la masa rocosa. Una cantera puede disponer de varios frentes situados al mismo nivel en distintas zonas o escalonadamente a modo de bancos extractivos (figura 2.7).



Figura 2.7.- Frentes de cantera de granito.

Una vez abierto el frente de dimensiones adecuadas, el corte de los bloques se puede realizar con distintas técnicas; aunque la más utilizada hoy día, es el corte con hilo diamantado.

Para llevar a cabo este proceso de corte con hilo, es necesario hacer primero con una perforadora (un martillo perforador hidráulico o neumático donde la herramienta de corte es una corona de carburo de wolframio) una perforación vertical y otra horizontal que se comuniquen. Una vez comunicada las dos perforaciones se introduce el hilo diamantado y se conecta a la máquina encargada de moverlo.

La cortadora de hilo diamantado consiste en un armazón de acero y dos poleas o volantes de gran diámetro para guiar y tensar el hilo diamantado. Esta máquina al mover el hilo a una velocidad determinada, produce el corte por el rozamiento de las perlas de diamante con la roca. Este proceso necesita de una refrigeración por agua. La velocidad de corte es de 2 a 5 m<sup>2</sup>/h para granitos. Con este procedimiento se suelen realizar tanto los cortes verticales de los lados, como el corte horizontal de despegue, como se indica en la siguiente figura 2.8:

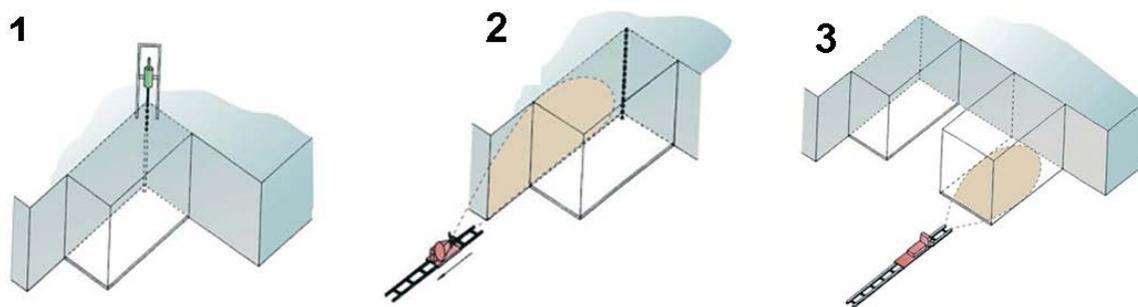


Figura 2.8: esquema del proceso de corte con hilo diamantado.

El corte de la parte posterior se realiza normalmente con una perforadora múltiple, que permite hacer perforaciones en línea recta cada 10 cm y con un diámetro adecuado para introducir los explosivos que van a romper la roca. La principal desventaja de este método, es la imposibilidad de aprovechar todo el volumen de material movilizado, al inutilizar el mismo por la aparición de fisuras o microfisuras durante el proceso.

Además de este tipo de corte en cantera existen otros métodos algunos de ellos en desuso (como la lanza térmica, que produce la rotura de la roca por dilatación térmica diferencial de los minerales componentes) y otros en fase de estudio o implantación (corte por chorro de agua a alta presión, uso del cemento expansivo, etc.).

Una vez que se ha realizado el corte del “pastillón” en el frente de cantera, hay que abatir el bloque para poder trabajar en él. Este proceso de vuelco se puede realizar con gatos hidráulicos o con la ayuda de implementos colocados en la pala cargadora, ambos elementos permiten el vuelco del material sobre una cama de arena. Sobre el bloque primario de granito en esta posición, se realizara el escuadre o dimensionado final del bloque mediante el empleo de perforación neumática o hidráulica, cuñas o pequeñas cantidades de explosivos, hasta alcanzar el tamaño y forma requerida para su transporte hasta la planta de transformación.

**El proceso de transformación o elaboración.** La transformación y elaboración de la piedra natural también ha alcanzado un grado de desarrollo tecnológico sorprendente en los últimos tiempos, como consecuencia de la mejora de las herramientas de corte y de un mayor conocimiento del material trabajado. La automatización de los procesos ha permitido reducir los costes de elaboración, con la consiguiente reducción de precio del producto final y una mayor penetración de la piedra natural en el mercado de los productos de construcción.

Los materiales procedentes de las canteras son elaborados mediante distintos procesos de transformación, para obtener los productos de rocas ornamentales que salen al mercado. El material más usual transformado en la fábrica está constituido por bloques escuadrados. De los bloques escuadrados, con forma de paralelepípedo regular, se extraen principalmente tableros laminados de espesor variable y una gran diversidad de tamaños. De los bloques con geometría irregular pueden utilizarse para obtener materiales de diversa tipología (bordillos, adoquines, objetos decorativos, etc.).

Las principales etapas del ciclo de elaboración de los materiales procedentes de las canteras, son las siguientes:

1. Escuadrado del bloque. Este proceso consiste en hacer los bloques procedentes de las canteras, más regulares. A veces se realiza al pie de la cantera para evitar el transporte de partes inútiles hasta la fábrica. Para ello se utiliza, en el caso del granito, máquinas de hilo diamantado.
2. Corte del material. Puede realizarse utilizando diferentes tecnologías, dependiendo del tipo de material a transformar y del producto a elaborar:
  - a. Corte con telar. Los bloques escuadrados, cuyas dimensiones óptimas son 3,0 x 1,5 x 1,5 metros, se introducen en los telares de donde salen tableros principalmente de 2 y 3 cm de espesor. En un telar se pueden colocar normalmente entre 70 y 100 flejes o hilos de corte. Hay dos tipos de telares: los telares de flejes diamantados y movimiento rectilíneo horizontal vertical, utilizados para el aserrado de mármoles, travertinos y otras calizas marmóreas, ya que con el granito no se obtienen resultados satisfactorios. El segundo tipo son los telares con flejes de acero de movimiento oscilante, en este caso, los flejes no son diamantados, el aserrado se consigue mediante un desplazamiento de forma oscilante añadiendo una masa abrasiva formada por granalla de acero (bolitas de apenas un milímetro de diámetro) o algún otro aditivo abrasivo. La granalla se utiliza normalmente para el corte de granitos, mientras que para el corte de mármol se utiliza arena silíceas, que minimiza las fracturas. La velocidad de avance está en 4 cm/h, diez veces menor que en los telares de flejes diamantados, pero aquí el número de flejes por telar es mayor y se acaban cortando más tableros.
  - b. Corte con hilo diamantado. Utilizado sobre todo para granitos. Las velocidades de corte varían y permiten realizar cortes verticales, horizontales y con formas curvilíneas, incorporándole un dispositivo de control numérico. El número de hilos

presentes en esta maquinaria puede ser muy variable, yendo desde un único hilo, hasta máquinas con 70 hilos de corte.

- c. Corte con cortadoras de disco. Capaces de utilizar discos de diferentes diámetros, dependiendo del producto final a elaborar. Su uso más extendido es en el corte del granito.
3. Tratamientos superficiales (o acabados superficiales). El desarrollo de nuevas maquinarias y técnicas ha permitido el desarrollo de nuevas técnicas de acabados. Una vez obtenidos los tableros, se le aplican los denominados tratamientos o acabados superficiales, que son todas las operaciones realizadas sobre el tablero para darle distintas propiedades estéticas (apariciencia, propiedades ópticas: brillo, opacidad, apariciencia envejecida, antideslizamiento, etc.). Estos tratamientos influyen enormemente en el aspecto visual del producto, y por eso suelen aplicarse principalmente por la cara vista, pero también modifican las propiedades físicas (características técnicas) de la piedra, ya que puede darle propiedades antideslizantes (requeridas para un pavimento de exterior), y pueden modificar la acción de los agentes medioambientales, al modificar la rugosidad o la composición de la superficie de la piedra. Los principales tratamientos superficiales utilizados en el granito son:
- a. Apomazado es el primer tratamiento que se aplica a todos los tableros procedentes de los telares y sirve para alisar la superficie eliminando los defectos o rugosidades que han quedado tras el corte. La apariciencia es de un pulido sin brillo.
  - b. El pulido consiste en obtener una superficie lisa y reflectante. El nivel máximo de pulido se denomina “pulido espejo”, ya que en estas condiciones se alcanza la reflexión de la luz en una superficie completamente lisa. El pulido es el tratamiento que más realza la belleza de la piedra natural y por ello el más utilizado tradicionalmente.
  - c. El abujardado es un tratamiento superficial donde se consigue una superficie rugosa mediante golpeo con una bujarda, que es un martillo que tiene relieves piramidales en la cara de golpeo. Se pueden utilizar distintos tamaños de pirámides para obtener distintos grados de abujardado. Para este acabado se utilizan abujardadoras, que son martillos neumáticos con la bujarda en el extremo y el tablero se pasa mediante un carro motorizado por debajo del brazo del martillo.
  - d. El flameado es un tratamiento con lanza térmica que produce una superficie muy basta e irregular. Es un tratamiento adecuado sobre todo para granitos y similares. El choque térmico provoca la expulsión de micas y hace que la superficie se vuelva rugosa con la retícula cristalina más visible. Las máquinas se denominan flameadoras, y su componente principal es un soplete móvil de oxipropano (oxiacetileno), que lanza una llama a elevada temperatura, entre 900 y 1000 °C.
4. Corte a medida. Una vez que el tablero presenta el acabado deseado, se procede al corte en piezas del tamaño y forma requerido. Normalmente, el corte se realiza con discos diamantados en distintos tipos de máquinas: cortadoras de puente (disco sujeto a una viga

de acero que lo desplaza por el tablero), cortadora multidisco continua (se utilizan varios discos a la vez, que también pueden producir cortes a escuadra), cortadora multidisco con banco giratorio (puente multidisco móvil y banco giratorio que permite hacer cortes ortogonales), cortadora de brazo o columna (el disco está fijo en un grupo motor y el banco es móvil, es la máquina más tradicional). También se pueden realizar cortes de gran precisión con agua a alta presión mezclada con sustancias abrasivas.

5. Acabado. Para obtener el producto final, en ocasiones es necesario la realización del tratamiento superficial de los cantos, los taladros para alojar los anclajes, etc.

#### **2.2.4 Puestos de trabajos u ocupaciones, relacionadas con el proceso extractivo y transformador de las rocas ornamentales.**

Las diferentes actividades relacionadas en los apartados anteriores (extracción y transformación de piedra natural), son realizadas por grupos de trabajadores que en la mayoría de las ocasiones y dependiendo del tipo y del tamaño de la empresa, pueden compaginar y desempeñar más de una tarea. Los puestos de trabajo tipo, procedentes del estudio sectorial, son agrupados por la Clasificación Nacional de Ocupaciones (C.N.O.) del Instituto Nacional de Estadística (INE, 1994), según la siguiente tabla 2.2:

Movimiento de tierras y rocas	Operador de máquina perforadora (minas). Jefe de campo en movimiento de tierras. Artillero de minas.
Perforaciones, sondeos y sostenimientos	Jefe de campo de prospecciones y sondeos. Sondista de prospección minera.
Arranque	Operador de máquina perforadora (minas). Barrenista. Minero de arranque de rocas para usos ornamentales. Artillero de minas. Palista.
Conformado	Elaborador de sillería. Operador de planta de beneficio de rocas ornamentales. Operador de telar para rocas ornamentales. Operador tornero-fresador Operador de máquina cortadora de roca. Operador de máquina cortabloques de rocas. Operador de máquina para elaborar piezas especiales con rocas. Operador de máquina para labrar piedra y/o pizarra. Operador de máquina para tratar piedra y/o pizarra. Labrador. Rajador. Serrador. Cortador. Jefe de planta de beneficio de rocas ornamentales. Labrista de piedra natural. Jefe de mecanizado.
Tratamiento superficial	Operador de planta de tratamiento y clasificación. Operador de máquina flameadora y abujardadora. Operador de máquina pulidora de rocas. Operador de tratamientos químicos para piedra. Jefe de tratamiento superficial.
Clasificación	Embalador/empaquetador/etiquetador. Verificador de calidad de piedra natural.
Colocación	Cantero de construcción. Colocador de pizarra. Solador en piedra natural. Pavimentador-empedrador. Colocador de placas. Colocador de fachadas ventiladas. Pulidor-abrillantador de suelos. Marmolista de la construcción.

Tabla 2.2. Clasificación Nacional de Ocupaciones (INE, 1994).

## **2.3 EL GRANITO ORNAMENTAL.**

Una vez conocidas las diferentes clasificaciones existentes en las rocas ornamentales (comerciales y geológicas), utilizaremos a lo largo de este trabajo aquella más usual en los ambientes relacionados con el sector de las rocas ornamentales, la clasificación comercial.

De este modo, hablaremos de “Granitos” para referirnos a toda roca de aspecto macrocristalino, textura granuda, compacta y que permitan su pulido por dispositivos mecánicos.

### **2.3.1 Caracterización tecnológica del granito utilizado en construcción.**

Los requerimientos técnicos y tecnológicos que acompañan a las rocas ornamentales, dependen de su uso final, de donde se vayan a utilizar, lo que hará que estos materiales estén sujetos a un tipo específico de normativa aplicable.

Las características técnicas de cada material utilizado en construcción, quedan definidas en las fichas técnicas que acompañan a estos materiales, producto de las determinaciones realizadas por los fabricantes y usuarios, para el conocimiento de sus características físico-mecánicas y físico-químicas, a fin de predecir su comportamiento y estimar su durabilidad.

La durabilidad de un material dependerá de una buena puesta en obra, de la selección del material y del dimensionamiento adecuado de las piezas a colocar, según las solicitudes a las que va a estar sometido.

Las características físicas y químicas de las diferentes variedades comerciales de piedra natural, constituyen su seña de identidad. Cada material presenta unas características propias, conocidas a través de ensayos normalizados realizados en laboratorio y perfectamente especificados en normas europeas.

Por sus características físico-químicas y físico-mecánicas, el granito es el material pétreo por excelencia para su uso especialmente en exteriores. Su elevada resistencia a la compresión y a la flexión, le confiere una gran estabilidad frente a las cargas; su alta resistencia a la abrasión, hace que su desgaste sea menor que el de otros materiales; su baja absorción y porosidad, hace que resista mejor que otras piedras las afecciones atmosféricas y las condiciones meteorológicas más adversas.

Las diferentes propiedades de la piedra natural, deben ser tenidas en cuenta a la hora de evaluar estos materiales para su uso en construcción, ya que tienen una gran influencia en el dimensionamiento de los diferentes productos, su resistencia mecánica, su aspecto estético o su durabilidad. Estas propiedades pueden ser divididas en tres categorías principales, según muestra la siguiente tabla (tabla 2.5):

PROPIEDADES		USOS							
		Elementos de carga	Fachada exterior	Revestimiento interior	Solado interior	Pavimento exterior	Bordillos	Escaleras, interior	Escaleras exterior
Ensayos de identificación	Petrografías	X	X	X	X	X	X	X	X
	Porosidad	X	X		X	X	X	X	X
	Resistencia a la compresión	X				X			
	Resistencia a la flexión		X	X	X	X	X	X	X
	Rotura de anclajes		X						
	Energía de rotura		X	X	X	X	X	X	X
	Resistencia la abrasión				X	X	X	X	X
	Densidad		X	X					
	Absorción	X	X		X	X	X	X	X
	Permeabilidad	X	X			X			X
	Módulo elástico		X	X					
	Ultrasonidos		X	X					
Necesidades de uso	Resistencia al deslizamiento				X	X	X	X	X
	Rotura de anclajes		X	X					
	Sensibilidad a las manchas				X	X		X	X
	Conductividad térmica		X	X		X			
	Reflectancia		X			X			
	Propiedades acústicas		X	X	X				
	Reacción al fuego	X	X	X	X			X	
Durabilidad	Resistencia a las heladas	X	X			X	X		X
	Cristalización de sales	X	X			X	X		X
	Choque térmico		X			X	X		X
	Descohesión granular		X			X			
	Estabilidad ante la lluvia ácida	X	X			X	X		X
	Estabilidad ante los ácidos					X			

Tabla 2.5: diferentes propiedades para el dimensionamiento de la piedra natural.

A modo de resumen y de forma esquemática, en la tabla 2.6 aparecen los valores más usuales que suelen presentar los granitos extremeños utilizados en construcción (Perianes et al, 2004). Las propiedades seleccionadas para este resumen, son algunas de las más utilizadas a la hora de dimensionar un producto de piedra natural o para predecir su comportamiento ante determinadas condiciones (climáticas, ambientales, uso, etc.) o sollicitaciones mecánicas. Estos valores medios proceden de estudios llevados a cabo sobre un gran número de ensayos realizados sobre granitos en los laboratorios de INTROMAC (acreditación ENAC nº228 / LE 685), bajo normativa UNE-EN en vigor:

<b>Propiedad</b>	<b>Normas de ensayo</b>	<b>Valores medios</b>
Densidad aparente	UNE-EN 1936	2.680 kg/m <sup>3</sup>
Absorción de agua a presión atmosférica	UNE-EN 13755	0,2 %
Porosidad abierta	UNE-EN 1936	0,6 %
Resistencia a compresión	UNE-EN 1926	155 MPa
Resistencia a flexión	UNE-EN 12371	15 MPa
Resistencia a la abrasión	UNE-EN 14157	18, 5 mm
Resistencia al choque	UNE-EN 14158	45 cm
Resistencia a las heladas	UNE-EN 12371	Sin variación tras ciclos

Tabla 2.6: cuadro resumen características medias del granito ornamental (elaboración propia).

### 2.3.2 Granito Gris Quintana

El material seleccionado para la realización de los diferentes estudios y determinaciones, es el granito denominado comercialmente como “Gris Quintana”, obtenido del batolito granítico de grandes reservas, ubicado en la localidad pacense de Quintana de la Serena.

Es un material de reconocimiento internacional por sus excelentes características físico-mecánicas y físico-químicas, que admite cualquier tipo de acabado, lo que permite su utilización en cualquier uso arquitectónico o decorativo.

#### Caracterización tecnológica del granito Gris Quintana

La variedad comercial conocida como “Gris Quintana”, corresponde a un granito biotítico de grano fino, con una textura por tanto granular. Es de color gris claro, leucocrato, formado principalmente por: cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa y biotita.

Los minerales biotíticos de color oscuro, por ser abundantes, confieren a la roca su aspecto moteado. Es frecuente en ocasiones encontrarse dentro de la masa granítica, acumulaciones de minerales máficos (minerales micáceos principalmente), formando nódulos más o menos redondeados, denominados dentro del “argot granitero”, gabarros.



Figura 2.9: aspecto del granito “Gris Quintana”.

La roca presenta una textura subidiomórfica-xenomórfica, inequigranular, de tamaño de grano fino/medio, que da lugar a una roca homogénea, no orientada. La clasificación geológica de la roca, obtenida a través de la realización del correspondiente estudio petrográfico, la cataloga como un monzogranito biotítico.

Es un material muy estudiado desde el punto de vista tecnológico, ya que el conocimiento de sus características, permite a prescriptores y usuarios dimensionarlo para sus diferentes usos.

A continuación, aparecen una serie de tablas de elaboración propia (tabla 2.7 y 2.8), cuya información procede de los trabajos realizados por la Junta de Extremadura en su libro “Atlas de las Rocas Ornamentales de Extremadura” (Perianes et al, 2004):

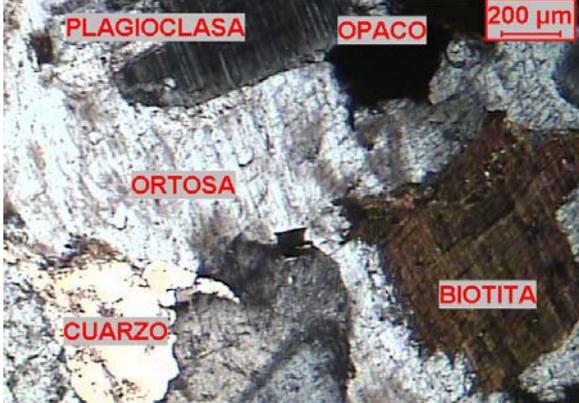
Estudio petrográfico del granito "Gris Quintana"		
Minerales principales	Minerales accesorios	Minerales secundarios
Cuarzo (28%) Feldespato potásico (27%): ortosa. Feldespato calcosódico (24%): plagioclasa. Biotita (13%).	Opacos (4%).	Clorita (3%). Sericita (1%).
		
Clasificación petrográfica: monzogranito biotítico		

Tabla 2.7: resumen características petrográficas (Perianes et al, 2004).

Las principales características físico-mecánicas recogidas en el Atlas de las Rocas ornamentales, anteriormente citado, son las siguientes:

<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DEL GRIS QUINTANA</b>	
Estudio petrográfico (UNE-EN 12407: 2001)	Monzogranito biotítico
Porosidad abierta (UNE-EN 1936:1999)	0.4 %
Densidad aparente (UNE-EN 1936:1999)	2650 Kg/m <sup>3</sup>
Resistencia a la compresión (UNE-EN 1926:1999)	170 MPa
Resistencia a la flexión (UNE-EN 12372:1999)	18.1 MPa
Módulo elástico (UNE 22-177:1985)	53125 MPa
Microdureza Knoop (UNE-EN 14205:2004)	2348 MPa
Determinación de la energía de rotura (UNE-EN 14158:2004)	5,39 J
Coefficiente de absorción de agua por capilaridad (UNE-EN 1925:1999)	0.283 g/m <sup>2</sup> .s <sup>0.5</sup>
Resistencia a las heladicidad (UNE-EN 12371:2002) (Variación Flexión)	8 %
Resistencia a la cristalización de las sales (UNE-EN 1370:1999)	0.06 %
Determinación de la carga de Rotura para anclajes (UNE-EN 13364:2002)	2600 N
Absorción de agua a Presión Atmosférica (UNE-EN 13755:2002)	0.2 %
Resistencia a la Abrasión (UNE-EN 14157:2005)	18.0 mm
Determinación de la resistencia al envejecimiento por choque térmico (UNE-EN 14066:2003)	Variación en masa: 0,02 % Variación módulo elástico: 16,36%
Determinación de la resistencia mediante péndulo de fricción (UNE-EN 142321:04)	Seco USRV: 77 Húmedo USRV: 69
Coefficiente de Expansión Térmica	7,2 x 10 <sup>-6</sup> x °C <sup>-1</sup>

Tabla 2.8: cuadro resumen de las características físico mecánicas del granito "Gris Quintana" (Perianes et al, 2004).

### Caracterización química y mineralógica del granito Gris Quintana

La composición química y mineralógica de los granitos, es una relación directa de su génesis y ésta variará dependiendo por tanto de su clasificación.

En trabajos internos realizados en INTROMAC, con el fin de conocer la composición química de los lodos procedentes de las operaciones de corte y pulido en fábricas de granito de Quintana de la Serena, se han obtenido una serie de valores composicionales medios, cuyos valores correspondientes a unas analíticas realizadas en octubre de 2013 se muestran en la tabla 2.3. Las determinaciones fueron llevadas a cabo por INTROMAC mediante fluorescencia de rayos X, utilizando un método rápido de análisis con apertura de 34 milímetros, en máscara de helio a 200 milibares de presión para evitar la aspiración de polvo por el equipo.

Análisis químico de lodos de granito (%)						
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	TiO <sub>2</sub>
67,78	13,11	5,883	5,464	3,518	2,22	0,793
Na <sub>2</sub> O	ZnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl	CuO	MnO
0,412	0,219	0,167	0,143	0,07	0,0458	0,0385
ZrO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	Rb <sub>2</sub> O	NiO		
0,0307	0,0228	0,0166	0,0101	0,008		

Tabla 2.3: análisis químico de los lodos del granito Gris Quintana (octubre de 2013).

Estas analíticas realizadas sobre los lodos, se completaron con determinaciones de tipo mineralógico (DRX, SEM, ATD-ATG), cuyos resultados recogidos en la siguiente tabla 2.4:

Análisis mineralógico semicuantitativo (% en peso)						
Mineral	Cuarzo	Feldespatos	Micas	Caolinita	Calcita	Oxihidróxidos de hierro
Contenido	22±8	43±7	21±7	6±4	7±6	4±3

Tabla 2.4: análisis mineralógico semicuantitativo del granito Gris Quintana (octubre de 2013).

Hay que tener en cuenta que la empresa seleccionada para este estudio procesa mayoritariamente granito Gris Quintana, la introducción en la línea de corte de granitos de otras procedencias pueden variar el resultado final de la analítica. Asimismo, tanto el contenido en CaO como en el de óxidos de hierro merece una consideración aparte, ya que son los componentes que contaminan el lodo como consecuencia de la operación de aserrado.

## 2.4 IMPORTANCIA DEL SECTOR DE LAS ROCAS ORNAMENTALES.

### 2.4.1 El Sector en cifras.

El Sector de las Rocas Ornamentales, por su importancia económica creciente y, sobre todo por su gran potencialidad, representa en la actualidad uno de los principales pilares de la minería española. La calidad de las materias primas pétreas y de los productos elaborados con ellas, así como la tradición y el carácter emprendedor de las empresas de Rocas Ornamentales, ha hecho de España junto con Italia, uno de los principales exponentes mundiales del Sector.

En los últimos años, el Sector de las Rocas Ornamentales se ha visto favorecido por una clara expansión a nivel mundial, debido entre otros motivos al incremento de las necesidades de construcción de viviendas, propiciado por el aumento de la presión poblacional. Se trata de un mercado muy dinámico y en evolución continua, sujeto a fuertes tensiones comerciales y de producción, lo que ha provocado que en los últimos años los países fabricantes y comerciantes tradicionales estén perdiendo cuotas de mercado.

La incorporación de nuevas tecnologías en las empresas del Sector de la Piedra Natural, ha significado un incremento en la productividad y en la competitividad de los productos de piedra natural, por el abaratamiento de la producción. Todas estas circunstancias han tenido especial relevancia en España, lo que ha favorecido el desarrollo de una importante industria de la Roca Ornamental, tanto a nivel nacional como regional.

Sin embargo, países como España o Italia, líderes mundiales tradicionales debido a su dominio de la industria principal y de la auxiliar, además de por su amplia experiencia en el sector amparada en su tradición, ven amenazado su dominio y peso en el sector en los últimos años, por la aparición de países emergentes como China, Brasil, Corea, India, etc., que se caracterizan por:

- La disponibilidad de grandes recursos geológicos.
- Una mano de obra con costes inferiores a los de la Unión Europea.
- Una normativa medioambiental menos exigente.
- Y por haber desarrollado en los últimos años tecnología punta en el sector del granito.

La aparición de estos nuevos productores en los mercados internacionales (Brasil, India, China, etc.) y nuevos mercados (Singapur, Corea, Hong-Kong, etc.), cobra cada vez mayor importancia. Las especiales características de los sistemas productivos de estas nuevas economías emergentes, se ven favorecidas por unos gastos salariales y de producción sensiblemente inferiores a los de los países del mundo desarrollado (menores costes sociales, medioambientales, seguridad, etc.). Son además países que por su ritmo y potencial de crecimiento tienen a su vez grandes necesidades de consumo interno, en algunos casos de productos que ellos mismos no pueden ofrecer o en cantidades que por el momento sobrepasan su oferta.

Este intenso mercado genera un complejo flujo de productos elaborados, semi-elaborados o en bruto, por todo el mundo (figura 2.10).

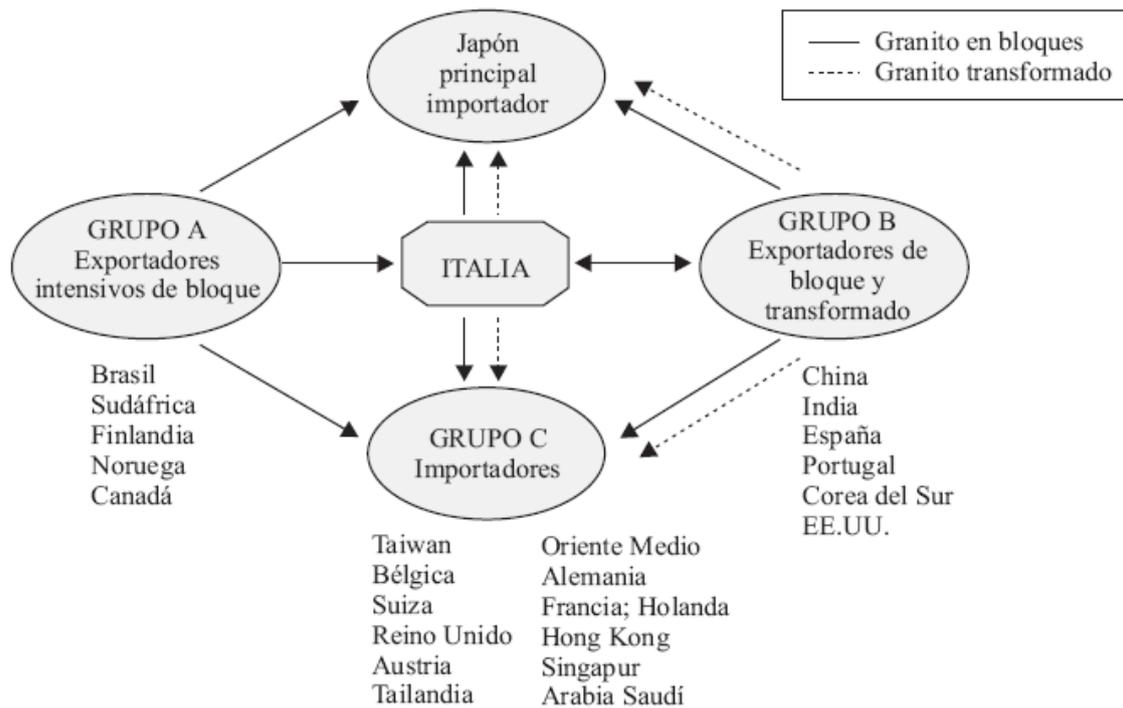


Figura 2.10: el mercado del granito ornamental en el mundo (López Jimeno, 1995).

El sector de las rocas ornamentales es tradicionalmente un sector íntimamente ligado al de la construcción, que en el caso de España, creció de forma muy importante en las últimas décadas, lo que sirvió también como motor para el sector de la piedra natural, situación que ha cambiado significativamente los últimos años. Esta tendencia creciente, se ha visto truncada desde finales del año 2007 en el sector de la construcción de viviendas, sumiéndose el mismo en una fase de desaceleración o de reajuste de oferta y demanda. Esta situación se ve agravada a su vez por una situación de incertidumbre en los mercados financieros, que puede influir de forma notable en el sector.

Una característica destacable de este sector es que, si bien las reservas de piedra natural se encuentran dispersas por todo el mundo, su producción se concentra con más del 80 % de la misma, en diez países: China, Italia, España, Turquía, Brasil, Portugal, Grecia, Corea del Sur, Francia y Estados Unidos.

España ha sido en los últimos años el tercer productor mundial de rocas ornamentales, tras China e Italia, siendo el primer productor mundial de pizarra de techar, primer productor europeo de granito y segundo productor mundial de mármol.

En lo referente al granito, el importante papel que desempeña España a nivel europeo y mundial, radica en que en torno a un 25% del suelo peninsular es granito. En este marco, Extremadura es en la actualidad junto con Galicia, referente nacional en el sector de las rocas ornamentales (granito). Galicia es el principal productor de granitos de España y a Extremadura le cabe el honor de ser la otra gran productora de granitos nacional y la más importante en cuanto al número de variedades

comerciales de granitos, ya que aproximadamente el 45% de las variedades comercializadas en España, se explotan en esta zona.

## 2.4.2 Las Rocas Ornamentales en España.

La mejor forma de documentar la importancia del sector de las rocas ornamentales en España, es a través del estudio de la información que anualmente se recogen a modo de números y de conclusiones, en los diferentes informes económicos elaborados para el Sector. Tradicionalmente estos informes eran elaborados por la Federación Española de la Piedra Natural (FDP), con la colaboración de diversas empresas y organismos.

En la actualidad, adquieren gran relevancia los informes realizados por el Observatorio del Mercado de la Piedra Natural (OMPN) dependiente de AIDICO (Instituto Tecnológico de la Construcción de Valencia). Este observatorio es un completo sistema de recogida, gestión, análisis y validación de la información, que permite a partir de una muestra representativa de empresas del sector, obtener información económica de gran valor para la toma de decisiones en las empresas, con un ámbito de actuación nacional.

Del análisis de los datos correspondiente al informe sectorial del 2010 del OMPN (AIDICO, 2011), podemos obtener una serie de datos y gráficas interesantes a la hora de comprender el valor del sector en la economía y en la actividad industrial del país. De este documento, se pueden extraer aquellos datos más significativos relativos a nuestra región y al material granítico, objeto de este estudio.

Aunque tradicionalmente España ha ocupado puestos más relevantes dentro del contexto internacional de las rocas ornamentales, los datos de producción de piedra natural en bruto (mármol y granito) del 2009, situaban a nuestro país como el 7º productor mundial (tabla 2.9), con una producción anual próxima a 7.200 miles de toneladas (2.150 millones de Euros) (AIDICO, 2011).

PAIS	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Var. 08/09
China	18.600.000	20.600.000	21.000.000	22.000.000	22.500.000	22.000.000	23.000.000	4,5%
India	14.221.000	15.528.000	17.367.000	19.000.000	21.500.000	21.000.000	21.000.000	0,0%
Turquia	6.200.000	7.725.000	8.250.000	9.400.000	9.500.000	11.000.000	11.500.000	4,5%
Iran	10.000.000	10.400.000	10.493.000	11.045.000	11.100.000	11.000.000	11.000.000	0,0%
Italia	10.810.623	10.883.849	10.658.758	10.105.000	9.710.000	9.185.000	9.100.000	-0,9%
Brasil	6.000.000	6.400.000	6.900.000	7.521.000	7.970.000	7.980.000	7.500.000	-6,0%
España	7.825.000	7.830.000	7.987.000	8.300.000	8.220.000	7.700.000	7.200.000	-6,5%
Egipto	1.950.000	2.200.000	2.800.000	3.300.000	3.500.000	3.600.000	3.600.000	0,0%
Portugal	2.792.545	2.950.190	2.948.732	3.122.358	3.201.535	3.200.000	3.100.000	-3,1%
USA	1.340.000	1.460.000	1.360.000	1.850.000	1.920.000	1.800.000	1.830.000	1,7%
Grecia	2.100.000	2.100.000	2.100.000	2.200.000	2.000.000	1.800.000	1.500.000	-16,7%
Francia	1.231.500	1.189.020	1.200.480	1.214.600	1.200.000	1.200.000	1.100.000	-8,3%
Resto	3.765.963	7.364.332	4.556.191	5.439.125	5.530.438	5.328.825	5.380.895	1,0%
<b>TOTAL</b>	<b>86.636.631</b>	<b>96.630.391</b>	<b>97.621.161</b>	<b>104.497.083</b>	<b>107.851.973</b>	<b>106.793.825</b>	<b>106.810.895</b>	<b>0,0%</b>

Tabla 2.9: evolución de la producción mundial de la piedra natural en bruto (AIDICO, 2011).

En los últimos datos de producción ofrecidos por las empresas del sector, se observa una notable tendencia decreciente en los datos de producción de piedra natural, situando la producción nacional

a niveles de 1998. Por materiales, es el mármol el material que más ha sufrido este descenso de producción por su relación más directa con la construcción de viviendas (figura 2.11).

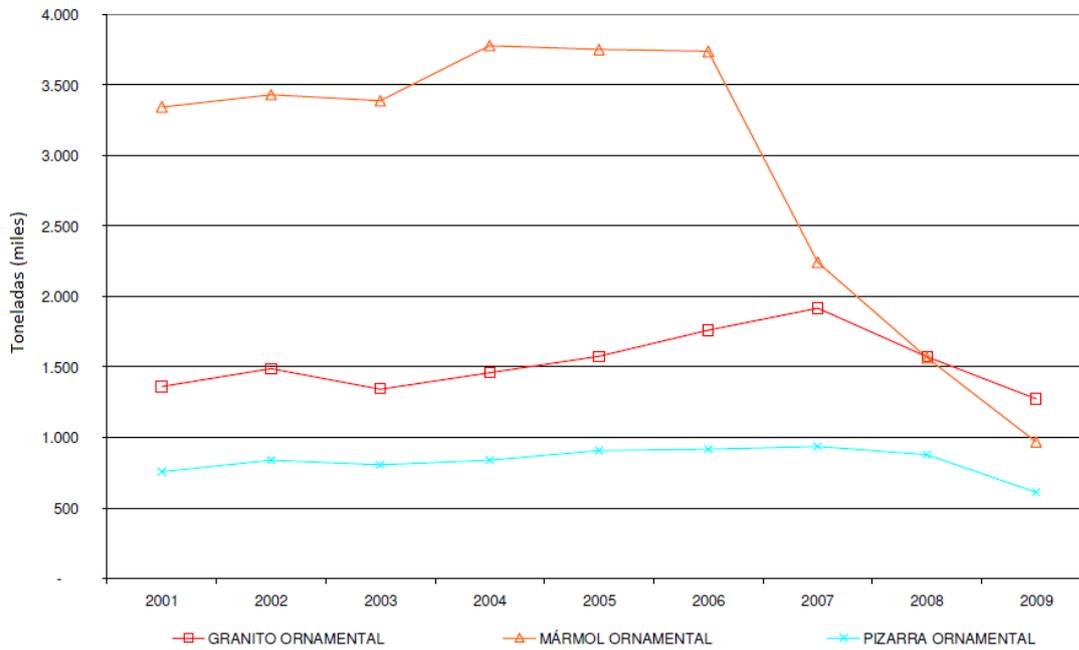


Figura 2.11: evolución de la extracción piedra natural en España. OMPN. (AIDICO, 2011)

Según podemos observar en la tabla 2.10, Extremadura mantiene su importancia dentro del sector extractivo de piedra natural. Hay que tener en cuenta que las grandes empresas del sector situadas en otras regiones (Galicia, Madrid, Andalucía...) mantienen centros de extracción en Extremadura, lo que contribuye a variar la balanza comercial con otras regiones.

	Exportaciones	Importaciones	Volumen de comercio	Balanza comercial	Posición competitiva
	Miles de €				
<b>COMUNIDAD VALENCIANA</b>	310.632,70	58.410,61	369.043,31	252.222,09	0,68
<b>GALICIA</b>	240.982,48	52.744,51	293.726,99	188.237,97	0,64
<b>CASTILLA Y LEON</b>	87.092,09	4.521,30	91.613,39	82.570,79	0,90
<b>ANDALUCÍA</b>	34.134,93	15.647,51	49.782,44	18.487,42	0,37
<b>CATALUÑA</b>	34.030,87	13.869,14	47.900,01	20.161,73	0,42
<b>MURCIA</b>	38.129,45	4.101,98	42.231,43	34.027,47	0,81
<b>PAIS VASCO</b>	17.830,59	10.768,26	28.598,85	7.062,33	0,25
<b>MADRID</b>	10.337,37	10.047,14	20.384,51	290,23	0,01
<b>BALEARES</b>	2.161,06	5.321,33	7.482,39	-3.160,27	0,42
<b>EXTREMADURA</b>	4.247,58	888,26	5.135,84	3.359,32	0,65

Tabla 2.10: indicadores de comercio exterior de piedra natural por comunidades, ejercicio 2010 (AIDICO, 2011).

Teniendo en cuenta la afirmación anterior, de que algunas empresas de otras regiones mantienen centros productivos en nuestra región, según los datos del 2010 recogidos en la tabla 2.11, Galicia monopoliza la salida de granito en bruto doméstico. Extremadura ocupa un puesto digno de mención, tanto por el volumen de material extraído como por la representatividad de sus variedades de granito.

### Miles de toneladas

Provincias	2010	%	2009	Var.
PONTEVEDRA	224.737,55	90,4%	186.121,24	20,7%
OURENSE	4.472,62	1,8%	3.483,51	28,4%
AVILA	3.807,95	1,5%	3.040,97	25,2%
MADRID	3.459,87	1,4%	3.528,52	-1,9%
BADAJOS	2.186,00	0,9%	2.160,72	1,2%
LLEIDA	1.512,61	0,6%	244,09	519,7%
GUIPUZCOA	1.275,48	0,5%	1.634,49	-22,0%
CORDOBA	1.206,09	0,5%	761,00	58,5%
ALICANTE	1.098,46	0,4%	2.547,48	-56,9%
ALBACETE	998,00	0,4%	669,09	49,2%
<b>Total</b>	<b>248.618,20</b>	<b>100,0%</b>	<b>209.854,87</b>	<b>18,5%</b>

Tabla 2.11: exportaciones de granito en bruto y elaborado, 2009. OMPN, fuente ICEX. (AIDICO, 2011).

### 2.4.3 Importancia del Sector de las Rocas Ornamentales en Extremadura.

Las rocas ornamentales representan para Extremadura más del 70% de su minería, destacando por su importancia y representatividad la extracción y transformación de granito. En los últimos años se ha pasado de 15 variedades de granitos explotadas en la Región Extremeña, a las más de 40 variedades comercializadas en la actualidad (la mitad de las variedades comerciales de granitos de España). Algunas de estas variedades son reconocidas a nivel internacional, como el caso del granito Gris Quintana, extraído en la localidad de Quintana de la Serena (Badajoz).

Extremadura ha ocupado en los últimos años el segundo lugar nacional en la extracción de granito y el tercero en la extracción de pizarra. En la actualidad, las variedades de granitos y pizarras extremeñas se exportan internacionalmente a la Unión Europea, EEUU, Oriente Medio, Japón, Australia...

Es cada vez más significativa la importancia que adquieren las empresas transformadoras de la región extremeña, lo que ha significado que Extremadura pase de ser una región que destacaba por su importante mercado o intercambio de bloques sin manufacturar, a ser una de las principales regiones elaboradoras de productos cuya materia prima es el granito, tan abundante en Extremadura. Este cambio de tendencia ha situado a nuestra región y especialmente algunas zonas de ella, como es el caso de Quintana de la Serena, como una de las principales en potencial transformador a nivel nacional e internacional, lo que supone a su vez un aumento del valor añadido de los productos de piedra que se manufacturan en la región.

El sector industrial de la roca ornamental es uno de los motores económicos de la comunidad extremeña, habiendo experimentado un constante y considerable crecimiento durante los últimos años y con expectativas de futuro muy prometedoras. El sector de roca ornamental representa actualmente más del 2% del PIB total de Extremadura y cerca del 5% del PIB industrial. El empleo directo que genera está por encima del 3% del empleo industrial directo de la comunidad y alrededor del 1% del empleo total, aunque se estima que el número de empleos que dependen indirectamente de esta actividad es mucho mayor.

La actividad industrial de la roca ornamental en la Comunidad Extremeña se concentra en comarcas determinadas, algunas de las cuales dependen casi fundamentalmente de esta actividad. Algunos ejemplos de esto son la localidad de Quintana de la Serena, conocida como la Ciudad del Granito, u otros municipios como Burguillos del Cerro, Plasenzuela o Villar del Rey, cuyo futuro socioeconómico está ligado al desarrollo de este sector.

Una característica que define empresarialmente al sector de la Piedra Natural es su elevada especialización sectorial y regional: la gran mayoría de las empresas centran su actividad en la extracción o elaboración de un tipo de roca ornamental, ya sea granito, mármol o pizarra, especialización que viene determinada por la proximidad geográfica a los yacimientos y la abundancia relativa de un tipo de roca u otra en una zona determinada.

La industria de la piedra natural se encuentra fuertemente concentrada. Necesita generalmente para desarrollar su actividad de forma eficiente, la proximidad a los yacimientos de las plantas de elaboración. Otra característica del sector, reside en el tamaño de sus empresas, tratándose de industrias fundamentalmente familiares. La mayoría no supera una dimensión media de 15 trabajadores, aunque junto a estas empresas medias, existen otras de grandes dimensiones que se han convertido en importantes exportadoras a nivel internacional.

Aunque parte del Sector conserva aún su carácter artesanal, es significativa la gran transformación tecnológica de las empresas, especialmente de aquellas más grandes, lo que ha implicado un reconocimiento mundial de la calidad de los granitos extremeños, que en la actualidad se exportan a todos los países del mundo.

El peso de Extremadura en el contexto del Sector de las Rocas Ornamentales de España ronda el 2%. Extremadura cuenta con el 2,77% del total de empresas españolas del sector (AIDICO, 2011).

Las cifras anteriormente presentadas le confieren a dicho sector una considerable importancia estratégica en la escala de la industria regional. De hecho, su cifra de empresas sitúa al sector de las roca ornamentales, en este caso extrapolando los datos a partir de los conceptos de "Extracción de minerales no metálicos ni energéticos" y "Fabricación de otros productos minerales no metálicos", como uno de los cinco sectores más relevantes de la rama industrial de Extremadura, en cuanto a número de empresas, sólo superado por la "Industria de productos alimenticios y bebidas", la "Fabricación de productos metálicos", la "Industria de la Madera" y la "Industria del Mueble" (UEx, 2009).

El tamaño de las empresas del sector de las rocas ornamentales de Extremadura, corresponde a empresas catalogadas como PYMES o MICROPYMES.

El paso de la elaboración de productos artesanales a productos más mecanizados, debido a las necesidades de la sociedad de consumo, obligó a un buen número de empresas a la construcción de instalaciones que les permitieran un mejor aprovechamiento de los recursos y un nivel de transformación de los mismos hasta ahora desconocido en la región.

Por último, cabe destacar en este apartado, el problema de salud laboral asociado a la actividad tanto extractiva como transformadora, al que se enfrentan los trabajadores de las empresas del sector. Debido a la singularidad de la actividad, a sus métodos de extracción y transformación, y a la

naturaleza del material elaborado, los trabajadores están expuestos a una atmósfera de trabajo que contiene cantidades variables de sílice en suspensión en el aire que respiran.

A pesar de que la sílice que contiene el granito no está considerada como una sustancia peligrosa, la fracción respirable generada en la manipulación del granito, puede causar efectos perjudiciales para la salud. La inhalación prolongada y/o masiva de polvo de sílice cristalina respirable, puede causar en los trabajadores expuestos, fibrosis pulmonar, denominada habitualmente como silicosis.

Las empresas están obligadas a adoptar una serie de medidas para cumplir con el valor límite ambiental (VLA-ED), establecido en el documento “Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos en España” editado por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT, 2012). En este documento, el límite de la concentración de sílice cristalina contenida en la fracción de polvo respirable, debe ser de  $0,1 \text{ mg/m}^3$  (como cuarzo) y de  $0,05 \text{ mg/m}^3$  (como cristobalita). Además, en este documento aparece una propuesta de modificación que rebaja el citado VLA-ED para la fracción respirable de cuarzo hasta  $0,05 \text{ mg/m}^3$ .

## 2.5 LA RADIACIÓN IONIZANTE

### 2.5.1 Origen de la radiactividad natural

El ser humano vive en un mundo rodeado de materiales radiactivos de origen natural. Así, recibe radiación cósmica procedente del espacio y radiación procedente de minerales radiactivos existentes en la corteza de la tierra. Ingiere a diario productos naturales que contienen normalmente muy pequeñas concentraciones de sustancias radiactivas. En sus huesos hay polonio y radio; en sus músculos, tritio, carbono y  $^{40}\text{K}$ ; en sus pulmones, tritio y también gases nobles radiactivos.

La exposición a la radiación ionizante puede deberse tanto a la componente de radiación externa como a la de radiación interna:

- Radiación externa. La radiación externa proviene de fuentes de radiación ionizante que se encuentran fuera del cuerpo humano. Estas fuentes pueden ser tanto naturales (cósmica, materiales presente en la corteza terrestre, materiales de construcción etc.) como artificiales, generadas por la actividad humana (manufactura de abonos, la combustión de carbón en plantas de energía, etc.). Los rayos gamma son el tipo de radiación que presentan el mayor riesgo de exposición a fuentes externas de radiación ionizante, por la energía y capacidad de penetración que tienen. Otros tipos de radiación ionizante, como las partículas  $\alpha$  y  $\beta$ , impactan en el cuerpo pero normalmente su capacidad de penetración en el organismo puede considerarse despreciable.
- Radiación interna. La radiación interna es la radiación ionizante emitida por materiales radiactivos naturales y artificiales que se encuentran dentro del cuerpo. Los materiales radiactivos penetran en el cuerpo humano diariamente a través del aire que se respira, el agua y los alimentos que se consumen. Los materiales radiactivos pueden acumularse en el cuerpo si se incorporan en mayor cantidad de la que abandona el cuerpo por la excreta de orina y de las

heces, o debido al decaimiento radiactivo. Los radioisótopos dentro del cuerpo pueden emitir rayos  $\gamma$ , partículas  $\alpha$  y/o partículas  $\beta$ , dependiendo del isótopo concreto del que se trate.

Las radiaciones ionizantes procedentes de los materiales radiactivos naturales integran la llamada radiación de fondo, que depende de numerosos factores: el lugar donde se vive, la composición del suelo, los materiales con los que realizamos nuestras construcciones, la estación del año, la latitud y en cierta medida, las condiciones meteorológicas.

El hombre, como todo ser vivo, está en contacto con un ambiente y con los factores que regulan su vida: temperatura, humedad, presión atmosférica, nivel de ruido, etc. Además, estamos expuestos y adaptados a una cantidad de radiación, que toleramos mientras se mantenga dentro de ciertos límites. La cantidad de radiación que recibimos del medio ambiente o del lugar que habitamos es muy variable de unos sitios a otros, dependiendo del sustrato rocoso sobre el que nos asentamos, de la altura sobre el nivel del mar, de la cercanía de yacimientos minerales, etc., y de los propios materiales de construcción que forman parte de la vivienda. No hay que olvidar que la radiación siempre ha existido en el medio ambiente, por lo que es inevitable recibir cierta dosis.

El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR, 2000) ha calculado que el promedio mundial de exposición anual de las personas a fuentes naturales de radiación es de 2,4 mSv/año (tabla 2.12). Algunas fuentes (como el uranio) pueden concentrarse en actividades mineras de extracción y en otras actividades industriales.

Fuente	Promedio mundial anual de la dosis efectiva (mSv)	Intervalo típico (mSv)
<b>Exposición externa</b>		
Rayos cósmicos	0,4	0,3–1,0
Rayos gamma terrestres (suelo, mat. construcción)	0,5	0,3–0,6
<b>Exposición interna</b>		
Inhalación (radón principalmente)	1,2	0,2–10
Ingestión (alimentos y agua de consumo)	0,3	0,2–0,8
<b>Total</b>	<b>2,4</b>	<b>1–10</b>

Tabla 2.12: valores promedio de dosis de radiación de fuentes naturales (UNSCEAR, 2000).

Los efectos que la radiación produce sobre la salud, son bien conocidos, lo que permite fijar a las autoridades competentes unos niveles de seguridad y de esta forma poder establecer sistemas de medida y reglamentos que protegen a la población o a los usuarios, de los posibles daños.

Son muchos los trabajos realizados destinados a tener un mejor conocimiento de las radiaciones emitidas por materiales radiactivos de origen natural. En España se realizó por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Empresa Nacional del Uranio (ENUSA) el Mapa Radiométrico de la península a escala 1:1.000.000 dentro del proyecto denominado «Proyecto MARNA» (CSN, 2000), figura 2.12. En estos mapas se pueden ver los valores medios de tasas de exposición y natural correspondientes a cada una de las provincias de la España peninsular. Los valores recogidos en este mapa están estrechamente ligados con la geología presente en la zona.

En un análisis rápido del mismo, se puede apreciar que los valores más altos corresponden a las provincias situadas en el centro y oeste de la península (materiales paleozoicos del macizo hispérico), mientras que los más bajos corresponden a las provincias situadas en el levante peninsular (donde afloran principalmente los materiales mesozoicos y cenozoicos).

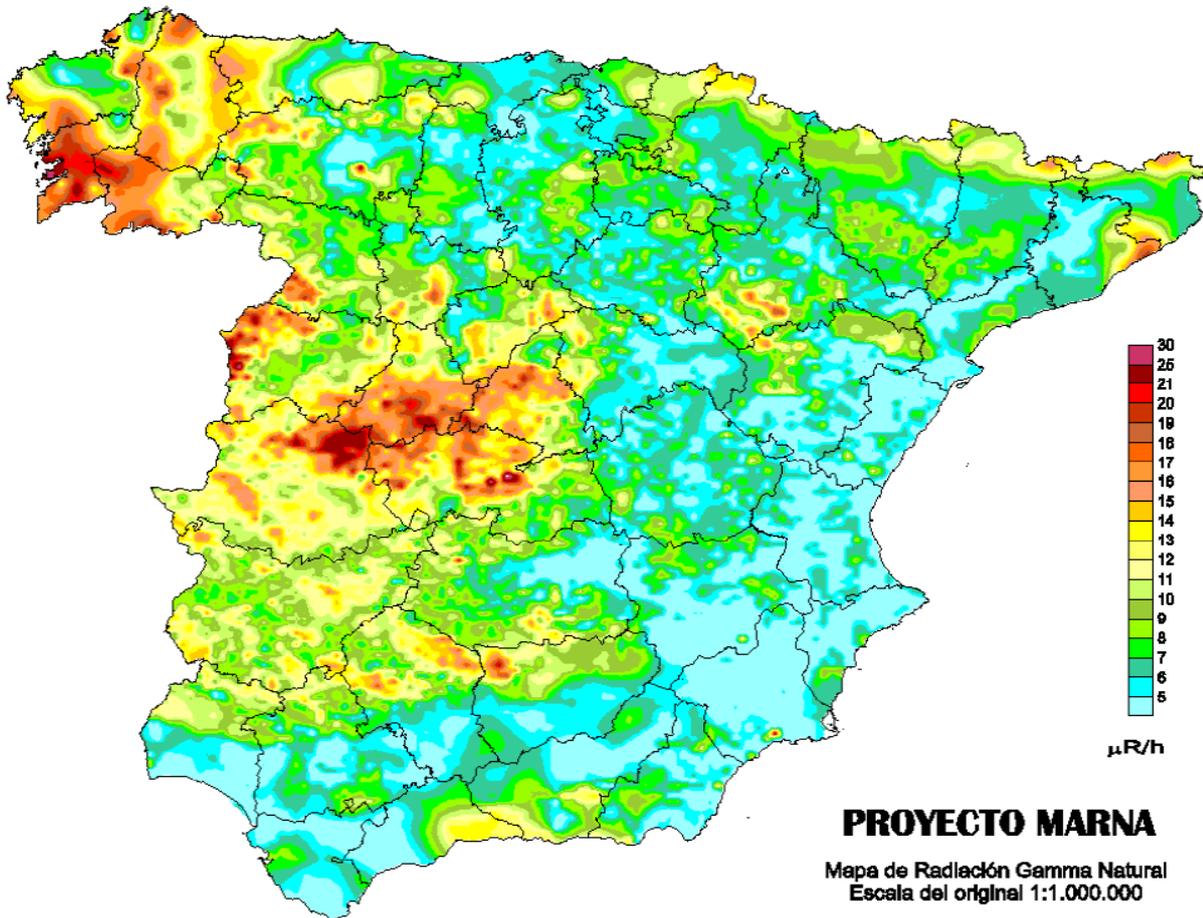


Figura 2.12: mapa de radiación gamma natural peninsular. Proyecto MARNA (CSN, 2000).

Los valores más altos están ligados generalmente a formaciones de rocas graníticas, mientras que los más bajos lo están a formaciones sedimentarias de origen marino.

En términos de radiactividad natural, los granitos pueden poseer cantidades considerables de uranio y torio, al compararlo con las concentraciones medias de estos elementos en la corteza terrestre. Una explicación a este fenómeno se basa en la incorporación de uranio y torio, concentrados en la fase líquida, a los minerales ricos en silicato, durante la fusión parcial y posterior vitrificación fraccionada del magma.

## 2.5.2 La radiactividad en la construcción

El hombre, en la búsqueda de su confort y su adaptación al medio en el que vive, ha desarrollado desde sus orígenes una arquitectura, basada en el desarrollo de materiales y técnicas constructivas.

Los materiales de construcción, como productos que incorporan materias primas naturales (más o menos elaboradas) con diferentes contenidos en elementos radiactivos, provocan una exposición directa de la radiación de origen natural al hombre, como usuario final. La fuente más importante de la exposición externa a la radiación en la construcción se debe a la radiación  $\gamma$  emitida de forma natural por los miembros de las cadenas de desintegración del uranio, del torio y por el  $^{40}\text{K}$ .

Todos los materiales de construcción derivados de materias primas procedentes de la corteza terrestre (rocas y suelo), contienen cantidades variables de radionucleidos naturales, principalmente de las serie del uranio ( $^{238}\text{U}$ ) y del torio ( $^{232}\text{Th}$ ), además del  $^{40}\text{K}$ . En la serie de desintegración del uranio, el elemento más significativo por su implicación radiológica es el radio ( $^{226}\text{Ra}$ ) y, por tanto, la referencia se hace a menudo al radio en vez de uranio. Las concentraciones medias a lo largo de todo el mundo de radio, torio y potasio en la corteza terrestre son alrededor de  $40 \text{ Bq kg}^{-1}$ ,  $40 \text{ Bq kg}^{-1}$  y  $400 \text{ Bq kg}^{-1}$ , respectivamente (RP 112. E.C., 1999). Existen diversos trabajos que recogen resultados sobre el contenido radiactivo de los materiales de construcción, como los realizados por Mustonen et al, 1997, y que se resumen en la tabla 2.13.

Material	Valores normales de concentración de actividad ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )			Valores máximos de concentración de actividad ( $\text{Bq kg}^{-1}$ )		
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
Materiales de construcción más comunes						
Hormigón	40	30	400	240	190	1600
Hormigón aligerado	60	40	430	2600	190	1600
Ladrillo de arcilla roja	50	50	670	200	200	2000
Ladrillo calizo-arenoso	10	10	330	25	30	700
Piedra natural	60	60	640	500	310	4000
Yeso	10	10	80	70	100	200
Materiales de construcción de subproductos						
Fosfoyeso	390	20	60	1100	160	300
Escorias de horno	270	70	240	2100	340	1000
Cenizas volantes de carbón	180	100	650	1100	300	1500

Tabla 2.13. Valores medios y máximos de actividad en los materiales y subproductos industriales utilizados como materiales de construcción en la UE. (Mustonen et al, 1997).

El  $^{238}\text{U}$ , como elemento generador de la cadena radiactiva en la que se genera el radón, se encuentra de forma natural y en cantidades variables en las rocas presentes en la corteza terrestre. Tras diferentes procesos extractivos y transformadores, estos materiales son incorporados al proceso constructivo en forma de diferentes productos, áridos, cementos, hormigón, roca ornamental, etc.

La exposición a la radiación emitida por los materiales de construcción puede ser dividida en exposición interna y externa. La exposición externa es causada directamente por la radiación  $\gamma$ . La exposición interna es causada, entre otros, por la inhalación de radón. En muchos casos, la concentración de radón en el interior de los edificios, procede en parte de sus propios materiales de construcción.

### 2.5.3 El radón.

De entre las exposiciones debidas a las fuentes terrestres, la contribución a la irradiación interna por inhalación de radón, gas noble radiactivo perteneciente a la serie del  $^{238}\text{U}$ , supone el 50% de toda la exposición debida a fuentes naturales radiactivas (NTP 533. INSHT, 1999).

El radón es un gas inerte con una vida media de 3,82 días, que se difunde en la atmosfera y que se origina como uno de los productos de la desintegración de elementos radiactivos. Puede ser absorbido mediante la respiración, por lo cual son afectados los pulmones. El radón y sus descendientes radiogénicos se introducen en los pulmones a través de las vías respiratorias, fijándose en ellos los isótopos de polonio y bismuto, generados por transformaciones sucesivas como consecuencia de la emisión de radiaciones ionizantes (figura 2.13).

Se estima que alrededor de una tercera parte de la dosis por radiación natural que recibimos proviene del radón, aunque estas cantidades pueden variar notablemente de un lugar a otro.

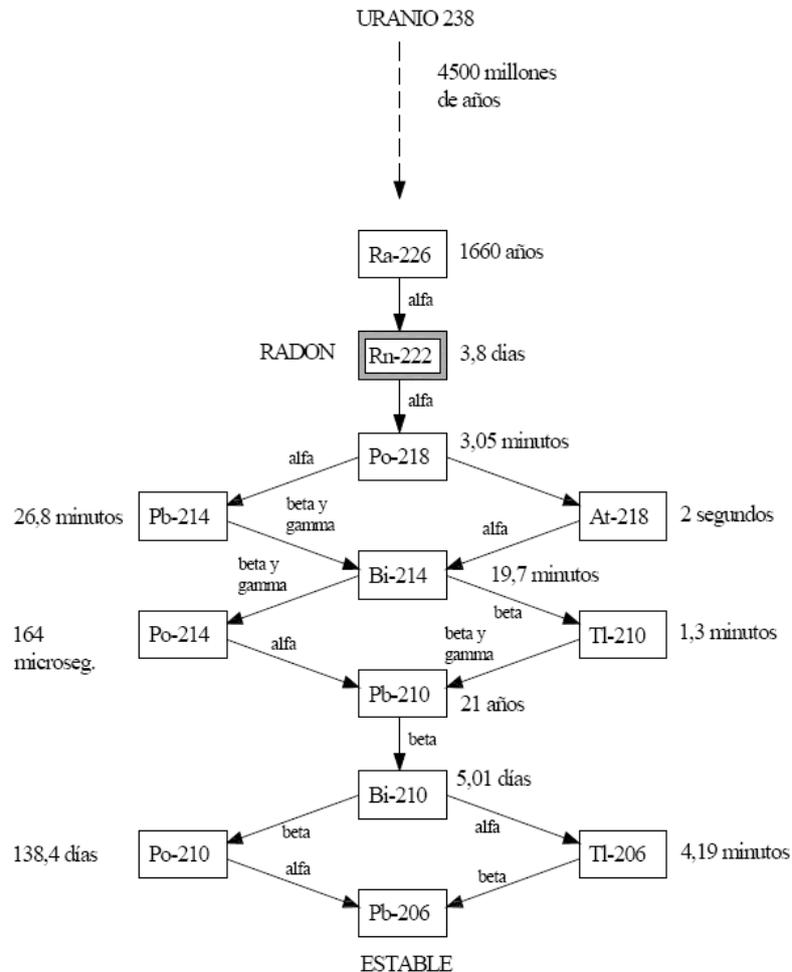


Figura 2.13: cadena radiactiva del  $^{238}\text{U}$ .



un sistema adecuado para limitar la exposición a las concentraciones de radón en el interior de edificios, prestando especial atención a la adecuada información al público. Los niveles de actuación establecidos son los siguientes:

- En viviendas existentes: 400 Bq/m<sup>3</sup>.
- En viviendas de nueva construcción (valor de diseño): 200 Bq/m<sup>3</sup>.

La Comisión Europea recomienda a sus Estados Miembros medidas de actuación en el caso de que se superen estos límites.

#### **2.5.4 El Código Técnico de la Edificación (CTE).**

El Código Técnico de la Edificación, CTE, (Ministerio de Fomento, 2006), es el marco normativo español por el que se regulan las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios, incluidas sus instalaciones, para satisfacer una serie de requisitos básicos de seguridad y habitabilidad, definidos por la Ley de Ordenación de la Edificación (LOE. Ministerio de Fomento, 1999). El Código Técnico de la Edificación está compuesto por una serie de Exigencias Básicas, desarrolladas a través de unos Documentos Básicos (DB).

En el caso de las Exigencias Básicas de Salubridad (HS), se recogen aspectos relacionados con la higiene, la salud y la protección del medioambiente. El objetivo de ellas es reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, padezcan molestias o enfermedades.

De esta forma queda definida la exigencia básica HS3 de “Calidad de aire interior”, con el objeto establecer reglas y procedimientos que permitan cumplir las exigencias básicas de salubridad. Para ello, los edificios dispondrán de medios para que sus recintos se puedan ventilar adecuadamente, eliminando los contaminantes que se produzcan de forma habitual durante el uso normal de los edificios, de forma que se aporte un caudal suficiente de aire exterior y se garantice la extracción y expulsión del aire viciado por los contaminantes.

A pesar de la creciente importancia que los temas relacionados con el radón suscitan entre los usuarios en España, no se ha establecido hasta el momento una regulación normativa específica, que garantice la protección frente al radón en las viviendas. Sin embargo, esta situación es posible que se modifique gracias a las futuras modificaciones del Código Técnico de la Edificación, CTE mediante la introducción previsible de algún apartado específico sobre este tema.

El documento debería incluir aspectos relacionados con el diseño y la construcción del edificio, para intentar asegurar que los ocupantes del edificio no estén expuestos a unas concentraciones de radón que pudieran implicar un riesgo para su salud. Esto significaría la inclusión de un valor medio anual de concentración máximo, utilizando como valor de referencia el establecido por la Comisión Europea de 200 Bq/m<sup>3</sup>, que no debería rebasarse dentro de las dependencias habitadas de los edificios.

### 2.5.5 Industrias NORM.

Existen instalaciones industriales que no guardan ninguna relación con el ciclo del combustible nuclear, pero que pueden dar lugar a una exposición radiológica de sus propios trabajadores y/o de la población, ya sea por vertidos o por la disposición de sus residuos o subproductos. Son industrias convencionales no nucleares que se caracterizan, bien por utilizar en sus procesos de producción materias primas enriquecidas en radionucleidos naturales, o bien por producir productos comerciales, sub-productos o residuos enriquecidos en estos radionucleidos. Las industrias o materiales que responden a estas características, son conocidas por las siglas NORM (acrónimo de Naturally Occurring Radioactive Material).

Estas materias primas se distribuyen de forma natural a lo largo de la corteza terrestre en las aguas, las rocas, los minerales y los suelos, conteniendo radionucleidos de las cadenas de decaimiento del  $^{238}\text{U}$ , del  $^{235}\text{U}$ , del  $^{232}\text{Th}$  y otros radionucleidos de larga duración como el  $^{40}\text{K}$ . En la mayoría de los casos, las concentraciones de origen natural de estos radionucleidos, no son lo suficientemente altas como para plantear problemas para el medio ambiente o la salud de los seres humanos, pero en aquellas situaciones en las que las concentraciones de estos radionucleidos pueden ser significativamente más altas con respecto al nivel medio, la salud humana puede verse afectada.

En las industrias consideradas como NORM deben tenerse en cuenta determinadas actuaciones derivadas de la potencialidad de la problemática derivada desde un punto de vista tanto de salud ocupacional, como de salud pública, derivados de la utilización de este tipo de productos.

La práctica habitual nos hace convivir con materiales susceptibles de ser clasificados como NORM. Muchas de las materias primas y minerales (aceite, carbón y de gas, mineral de hierro, bauxita, fosfatos, etc.), los productos básicos (agua, materiales de construcción, fertilizantes, etc.) y los dispositivos (por ejemplo, varillas de soldadura o componentes electrónicos, etc.) utilizados en nuestra actividad diaria, pueden considerarse como NORM.

En algunos sectores, la gestión de las posibles exposiciones a este tipo de materiales ya está siendo abordada, aplicando en su caso, medidas de protección radiológica para el personal implicado en determinadas tareas.

Dentro de esta clasificación de industrias NORM, se pueden encuadrar a las empresas extractivas y transformadoras del Sector de las Rocas Ornamentales, puesto que su materia prima, extraída de la corteza terrestre contiene de forma natural y en cantidades variables, minerales con diferentes concentraciones de radionucleidos ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ ).

### 2.5.6 Radiactividad y rocas ornamentales.

Las rocas ornamentales y en particular el granito, como materiales naturales provenientes de la corteza terrestre, pueden contener concentraciones variables de diferentes radioisótopos, de acuerdo a su génesis y contenido mineralógico.

Al igual que el resto de materiales de construcción, el uso extensivo del granito ornamental en la edificación, ha propiciado la necesidad de adaptación de la piedra natural a la reglamentación y a la

normativa vigente o en fase de estudio, con lo que en los últimos años se han realizado diversos trabajos destinados a caracterizar radiológicamente las diferentes rocas comercializadas a lo largo de todo el mundo.

En la tabla 2.14, aparecen relacionados diversos trabajos recopilados de la bibliografía existente, de los que se ha extraído información sobre la actividad específica y el radio equivalente de diversas rocas ornamentales, utilizadas como productos para la construcción.

En esta tabla 2.14, se observa como los materiales calcáreos (mármoles y calizas) son los que presentan unas actividades específicas menores para los elementos analizados. Las actividades mayores corresponden a los denominados granitos comerciales, que además presentan una variabilidad notable, dependiendo de la litología específica analizada.

Bibliografía	Procedencia	Nº Materiales	Material	Actividad específica (Bq/kg)				Ra eq. (Bq/kg)
				<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>226</sup> Ra	<sup>40</sup> K	
RP 112 (1999)	Mundial	n/a	Corteza terrestre	40	40		400	
Chen & Lin (1996)	Mundial	137	Granito		73	42	1055	
UNSCEAR (2000)	Mundial	n/a	Suelos	33	30	35	400	
			Granitos construcción		84	77	1200	
Walley (2001)	Mundial	60	Mármol Egipto	4 – 148	2 – 3	5 – 182	5 – 43	5 – 151
			Mármol mundial	3 – 5	1 – 2	6 – 8	5 – 32	5 – 9
			Granito Egipto	30 – 130	10 – 63	30 -122	127 – 1335	92 -230
Tzortzis (2003)	Mundial	28	Granito		143	77	1215	
Wafaa (2004)	Egipto	50	Granito	5 – 4545	3 – 300		160 – 3718	40 – 4645
Anjos (2005)	Brasil	95	Granito		73	31	1648	
Orgun (2005)	Turquía		Granito		51 – 351	43 – 651	418 – 1618	
Xinwei (2005)	China	20	Granito		17 -187	15 – 205	186 – 1746	67 – 490
Pavlidou (2006)	Mundial	16	Granito	61	81	64	1104	
El-Arabi (2007)	Egipto	49 (10+39)	Granito		1,4 – 14,9	2,9– 31,8	132 – 2080	15 – 625
					9,8 – 3834	8,93 – 9087	132 – 10230	471 – 13982
El-Taher (2007)	Egipto	20	Granito		31	24	590	
Ferdoas (2007)	Mundial	37	Mármol	1 – 44	0 – 32	0 – 32	1 – 897	1 – 133
		20	Granito	0 – 314	0 – 186	0 – 147	0 -1532	0 -505
Sakoda (2008)	Japón	1	Granito		21	895	779	
	Austria	1	Granito		64	7064	1169	
Harb (2008)	Egipto	30	Granito	12 – 19	10 – 18	10 – 19	299 – 956	49 -113
Kitto (2009)	Importados USA	23	Granito	31	61		1210	
		9	Granito	1140	290		1060	
Turtiainen (2007)	Finlandia	12	Piedra natural		23-380	12-170	980-1690	
Steck (2009)	Mundial	29	Granito	57	69		1140	
Capik (2009)	Turquía	1	Granito		59	45	725	
TAEK (2010)	Turquía	88	Granito y mármol		85	88	901	
Moura (2011)	Brasil	14	Granito		10 – 347	12 -252	408 – 1615	57 – 753
Turgay (2012)	Mundial	12	Granito		60	61	851	43-420

Tabla 2.14: actividad específica y radio equivalente para diversos materiales (elaboración propia).

Hay trabajos como el de Wafaa, 2004, el de El-Arabi, 2007, ó Sakoda et al, 2008 realizados sobre diferentes tipos de granitos, que presentan valores anormalmente altos de algunos de los radionucleidos analizados (en relación con los valores de los otros trabajos) y que han sido identificados por los propios autores como anomalías geo-mineralógicas.

De igual forma, la tabla 2.15 recoge una serie de valores atendiendo al índice de riesgo I (RP-112), procedentes de diferentes trabajos de la bibliografía existente:

Bibliografía	Procedencia	Nº Materiales	Material	Índice de riesgo (I)
Baeza, A et al (1992)	España		Granito	0,9
Risica, S et al (1999)	Finlandia, Dinamarca, Noruega		Granito	1,1
Yu, K.N. et al (2000)	China		Granito	1,7
Anjos (2005)	Brasil	95	Granito	0,0-2,9
Medhat, M.E. (2009)	Egipto		Granito	0,8
Joshua, E.O. et al (2009)	Nigeria		Granito	1,4
Kitto (2009)	Importados USA	23	Granito	0,6-1,1
		9	Granito	1,5-10,9
Turgay (2012)	Mundial	12	Granito	0,2-1,5

Tabla 2.15: índice de riesgo I (RP-112) para granitos de diversa procedencia (elaboración propia).

En la tabla 2.15, se puede ver cómo los valores del índice I para los diversos granitos analizados, tienen órdenes de magnitud similares, con algunas excepciones propias de la litología concreta analizada.

### 2.5.7 Normativa aplicable.

La radiactividad natural, en general, y en particular la radiactividad natural en materiales de construcción, ha sido un tema siempre presente por diversos motivos, en las carteras de trabajo de diferentes organismos y entidades de carácter nacional e internacional. Es sin embargo, en los últimos años cuando ha experimentado un importante desarrollo normativo y prenормativo gracias a la aparición de diversos trabajos, guías y recomendaciones. Estos desarrollos, buscan una caracterización radiométrica de diferentes ambientes (públicos o privados) así como de los materiales en ellos presentes, con el fin de proceder a una clasificación de los mismos de acuerdo a la peligrosidad natural y su posible afección en su uso como material de construcción.

Son múltiples los organismos y comisiones que trabajan en esta materia como ICRP, UNSCEAR, OIEA, OMS, CSN, entre otros.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) considera que la exposición a las radiaciones ionizantes, puede ser potencialmente dañina para la salud. Establece por ello, tres principios fundamentales de protección ante la exposición radiológica:

1. Justificación: no se podrá llevar a cabo ninguna actividad en la que estén implicadas las radiaciones ionizantes, si no es posible demostrar el beneficio neto positivo de su desarrollo.

2. Optimización: la magnitud de las exposiciones individuales, el número de personas expuestas y la probabilidad de incurrir en dichas exposiciones, se mantendrán tan bajas como sea razonablemente posible, desde un punto de vista tanto económico como social (principio ALARA, en inglés, As Low As Reasonably Achievable; o tan bajo como sea razonablemente posible, en español).
3. Limitación: ningún individuo podrá ser expuesto a un riesgo de radiación que se considere inaceptable en cualquier circunstancia normal.

La ICRP reconoce que toda persona está sujeta a una exposición a la radiación de fondo. Esta exposición puede verse incrementada por diversos factores, como los asociados a los materiales utilizados en construcción o las actividades relacionadas con las Industrias NORM.

Desde la Comisión Europea se ha redactado una serie de guías y de informes técnicos relativos a las industrias NORM, que aparecen resumidos en la tabla 2.16.

<b>General</b>	<b>RP 88</b> (Recommendations for implementing Title VII of the Directive)	
<b>Trabajadores</b>	<b>RP 95</b> (Reference activity concentration levels for the identification of workplaces)	<b>RP 107</b> (Information relating to the establishment of the reference levels in RP 95)
<b>Materiales de Construcción</b>	<b>RP 112</b> (Radiation Protection principles concerning building materials)	<b>RP 96</b> (Building materials with enhanced levels of natural radioactivity)
<b>Excepciones</b>	<b>RP 122 Part II</b> (Application to natural sources of radioactivity)	

Tabla 2.16: guías e informes relativos a las industrias NORM, procedentes de la Comisión Europea.

En el documento denominado “Radiation Protection 112: Radiological Protection Principles concerning the Natural Radioactivity of Building Material”, elaborado por un Grupo de Expertos dependientes de la Dirección General de Medioambiente, Seguridad Nuclear y Protección Civil de la Comisión Europea, se provee a los Estados Miembros de una guía que contiene información armonizada sobre la radiactividad natural de los materiales de construcción, con el fin de permitir la libre circulación de los productos de construcción en la Unión Europea, limitando los niveles de exposición a la radiación por el uso de estos materiales. Para ello se han tenido en cuenta diferentes factores, como la restricción del contenido en radio (generador de radón) en los materiales de construcción, de modo que no se supere en interiores, concentraciones de radón superiores a los niveles recomendados por la Comisión ( $200 \text{ Bq m}^{-3}$ ).

La normativa de referencia para las industrias NORM, es el Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre. En este Real Decreto modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra las radiaciones ionizantes, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio. En este documento se

establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes.

El título VII de este Reglamento se refiere a las fuentes naturales de radiación y en él se identifica de forma genérica las actividades laborales en que los trabajadores y, en su caso, los miembros del público, pueden estar expuestos a este tipo de radiación. La modificación del Real Decreto de 5 de noviembre de 2010 establece que sean los titulares de las actividades en las que existan fuentes naturales de radiación, los responsables de realizar los estudios necesarios para determinar si existe un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o de los miembros del público, que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica, sin necesidad de que estos estudios sean exigidos por la autoridad competente. Además, se designan como autoridad competentes en esta materia a los órganos en materia de industria de las Comunidades Autónomas.

Además, con el fin de disponer de información sobre estas actividades, se obliga a los titulares de las actividades laborales en las que existan fuentes naturales de radiación a declarar estas actividades ante los órganos competentes en materia de industria de las Comunidades Autónomas en cuyo territorio se realizan estas actividades laborales, que incluirán dichas declaraciones en un registro que se crea a tal efecto, denominado *Registro de actividades laborales con exposición a la radiación natural*. Se establece también, al objeto de disponer de información conjunta, un registro central en la Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, al que los referidos órganos competentes autonómicos deberán remitir copia de las declaraciones.

Adicionalmente, se amplía esta regulación al almacenamiento y manipulación de los residuos generados en las actividades en las que existan fuentes naturales de radiación y no solo a la generación de los mismos, como hasta ahora.

El reglamento no es de aplicación a las situaciones de exposición al radón en las viviendas, ni a los niveles naturales de radiación, es decir, a los radionucleidos contenidos naturalmente en el cuerpo humano, los rayos cósmicos a nivel del suelo, y la exposición en la superficie de la tierra debida a los radionucleidos presentes en la corteza terrestre no alterada.

### **2.5.8 Las rocas ornamentales y las industrias NORM.**

Debido a la naturaleza de las rocas ornamentales, así como a su contenido mineralógico y radiológico  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , estos materiales pueden ser incluidos dentro de la clasificación de industrias NORM.

En el Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre de 2010, se hace referencia a actividades de sectores que incluyen:

- i. Actividades laborales en que los trabajadores y, en su caso, los miembros del público están expuestos a la inhalación de descendientes de torón o de radón, a la radiación gamma o a cualquier otra exposición en lugares de trabajo, tales como establecimientos

termales, cuevas, minas, lugares de trabajo subterráneos o no subterráneos en áreas identificadas.

- ii. Actividades laborales que implican el almacenamiento o la manipulación de materiales que habitualmente no se consideran radiactivos, pero que contienen radionucleidos naturales que provocan un incremento significativo de la exposición de los trabajadores y, en su caso, de miembros del público.
- iii. Actividades laborales que generan residuos que habitualmente no se consideran radiactivos, pero que contengan radionucleidos naturales que provocan un incremento significativo en la exposición de los miembros del público y, en su caso, de los trabajadores.

Por tanto, el sector de las rocas ornamentales es uno de los sectores que se podría ver en la obligación de dar cumplimiento a lo establecido en la legislación vigente, lo que obliga a las empresas del sector a estar en disponibilidad de aportar toda la documentación acreditativa necesaria, en el caso de ser requerida por la Autoridad competente, con el fin de demostrar su grado de cumplimiento con el Real Decreto.

La consideración estratégica que el sector de las rocas ornamentales tiene en Extremadura, hace que la temática relacionada con los contenidos radiológicos de los granitos adquiera gran importancia.

La aplicación del Título VII del Real Decreto 783/2001, obliga a los titulares de las actividades laborales en las que existan fuentes naturales de radiación (industrias NORM), a la realización de una serie de estudios y trabajos encaminados a demostrar si existe o no, un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o de los miembros del público, que les obligue en su caso, a tomar las medidas y protecciones adecuadas.

## **2.6 LA PROTECCIÓN RADIOLÓGICA. NORMATIVA**

La demanda de la sociedad actual y las instituciones encargadas en preservar la calidad de vida de los ciudadanos, ha llevado a la protección radiológica a adquirir una importancia cada vez mayor en nuestra vida cotidiana y laboral. La protección radiológica es una disciplina que estudia los efectos de las dosis producidas por las radiaciones ionizantes y los procedimientos para proteger a los seres vivos, especialmente los seres humanos, de sus efectos nocivos. Esta protección está encaminada a la búsqueda de recomendaciones: recomendando límites de dosis, redactando planes de emergencia, limitaciones de usos, planificando actuaciones en caso de emergencia, etc.

Las acciones recomendadas por la protección radiológica deberán estar justificadas de forma conveniente, siendo la mejor de las opciones existentes, tanto para el individuo como para la sociedad en su conjunto. Además, todas las acciones deberán realizarse de forma tal que estén hechas del mejor modo posible, según la tecnología existente en el momento y el grado de conocimiento humano que se posea.

A la hora de establecer una limitación de dosis, la protección radiológica sigue el principio reflejado en las siglas ALARA. Aunque una recomendación esté justificada porque el beneficio reportado es mayor que las desventajas, y optimizada según la tecnología, se intentará por todos los medios

posibles que la dosis recibida por cualquier individuo o por un colectivo cualquiera, sea lo más baja posible, siempre que las medidas de protección y minimización de dosis no supongan un daño mayor para el individuo o la sociedad.

La toma de conciencia del peligro potencial que tiene la exposición excesiva a las radiaciones ionizantes ha llevado a las autoridades competentes en la materia, a fijar las normas reglamentarias para los límites de dosis. Estos límites corresponden a un riesgo suplementario aceptable respecto al riesgo natural. La complejidad a la hora de legislar sobre estos temas, conlleva la creación de diferentes estamentos u organismos, con actividades y funciones muy definidas:

1. **Bases científicas:** el establecimiento de las bases científicas y principios generales sobre la protección radiológica, son tarea fundamental de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR o ICRP en inglés). Creada en 1928, está constituida por un grupo de expertos de carácter multidisciplinar, que reúne principalmente a médicos, físicos y biólogos, de todos los países. Es considerada como una autoridad científica independiente que se dedica a trabajar sobre temas de protección radiológica, emitiendo recomendaciones sobre la materia, aplicables a las reglamentaciones de cada Estado cuando se considera necesario por los mismos.
2. **Principios generales:** los principios generales en términos prácticos, son definidos por diferentes organismos, con el fin de facilitar el desarrollo posterior de las regulaciones nacionales de los diferentes países. Entre ellos podemos destacar por su interés:
  - a. La UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) reúne a científicos representantes de 21 naciones. Se creó en 1955 en el seno de la ONU para reunir el máximo de datos sobre los niveles de exposición debidos a las diversas fuentes de radiaciones ionizantes y sus consecuencias biológicas, sanitarias y medioambientales. Constituye un balance regular de estos datos, pero igualmente una evaluación de los efectos estudiando los resultados experimentales, la estimación de las dosis y los datos humanos.
  - b. El OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica, o en inglés IAEA, International Atomic Energy Agency) es el principal foro intergubernamental para la cooperación científica y técnica en materia de utilización de la energía nuclear con fines pacíficos. Edita periódicamente normas de seguridad y protección radiológica aplicable a las industrias y prácticas que utilizan radiaciones, utilizando las últimas recomendaciones de los organismos científicos (como la CIPR o la UNSCEAR). Esas normas no son de obligado cumplimiento para los países miembro del Organismo, a no ser que soliciten la asistencia del propio Organismo. Sin embargo, en gran medida se utilizan como base para elaborar la legislación de la mayor parte de los estados.
  - c. La OMS (Organización Mundial de la Salud) es la autoridad directiva y coordinadora de la acción sanitaria en el sistema de las Naciones Unidas. Es la responsable de desempeñar una función de liderazgo en los asuntos sanitarios mundiales, configurar la agenda de las investigaciones en salud, establecer normas, articular opciones de política basadas en la evidencia, prestar apoyo técnico a los países y vigilar las tendencias sanitarias mundiales.

- d. El INPR (Institutos Nórdicos de Protección Radiológica), creado en los años setenta de forma conjunta en los cinco países nórdicos, por la importancia que los aspectos de protección del público frente a la radiación natural, han tenido tradicionalmente en estos países. Encargados de desarrollar recomendaciones de protección, frente a las fuentes naturales de radiación.
  - e. A nivel europeo, la Unión Europea utiliza estas recomendaciones en sus propias normas o directivas.
3. **Normas y guías:** finalmente, son cada uno de los países a través de los organismos creados a tal efecto en su legislación, los encargados de desarrollar las diferentes regulaciones y establecer las normas y guías que faciliten la mejor aplicación práctica en términos de protección radiológica.

A continuación y de forma resumida, se enumeran algunos de los documentos elaborados por las diferentes autoridades anteriormente enumeradas, y que servirán de apoyo y base para la realización de los diferentes trabajos sobre los que versa esta tesis

- ICRP:
  - ICRP 24. "Radiation protection in uranium and other mines" (1976).
  - ICRP 39. "Principles for limiting exposure of the public to natural sources of radiation" (1984).
  - ICRP 47. "Radiation protection of workers in mines" (1985).
  - ICRP 60. "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" (1990).
  - ICRP 65. "Protection against Rn-222, at home and at work (1993).
  - ICRP 82. "Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure" (2001).
  - ICRP 103. "The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection" (2007).
- IAEA: edición de documentos relativos a la protección radiológica en diferentes industrias NORM y en lugares de trabajo con exposición al radón:
  - "Radiation protection against radon in workplaces other than mines". Safety Reports. Series nº 33 (2003).
  - "Radiation and waste safety in the oil and gas industry". Safety Reports. Series nº 34 (2003).
  - "Occupational radiation protection in the mining and processing of raw materials". Safety Guide nº RS-G-1.6. (2004).
  - "Assessing the need for radiation protection measures in work involving minerals and raw materials". Safety Reports. Series nº 49 (2006).
  - "Radiation protection and NORM residue management in the Zircon and Zirconia industries". Safety Reports. Series nº 51 (2007).

- OMS
  - “Air Quality Guidelines for Europe” (1987 y 2000)
  - “Drinking Water Regulations” (1993 y 2004).
  - “Who handbook on indoor radon. A public health perspective” (2009).
- INPR:
  - “Naturally Occurring Radiation in the Nordic Countries-Recommendations” (1986 y 2000)
  - “Recommendations for radon in dwellings in the Nordic countries” (2009)
- UE:
  - Directiva 89/106. “Relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias administrativas de los estados miembros sobre los productos de construcción” (1989).
  - Recomendación 90/143. “Relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios” (1990).
  - Directiva 96/29. “Normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes” (1996).
  - Directiva 98/83. “Relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano” (1998).
  - Recomendación 20/2001. “Relativa a la protección de la población contra la exposición al radón en el agua potable” (2001).
  - “Draft European Basic Safety Standards Directive” (2010).

La UE ha ido publicando una serie de documentos con objeto de clarificar ciertos aspectos de la Directiva 96/29, principalmente en relación con las industrias NORM:

- Carácter general:
  - Radiation Protection 88. “Recommendations for the implementation of Title VII of the European Basic Safety Standards Directive (BSS), concerning significant increase in exposure due to natural radiation sources” (1997)
- Referencia a los trabajadores:
  - R.P. 95. “Reference levels for workplaces processing materials with enhanced levels of naturally occurring radionuclides” (1999).
  - R.P. 107. “Establishment of reference levels for regulatory control of workplaces where materials are processed which contain enhanced levels of naturally occurring radionuclides” (1999).
- Referencia a los materiales de construcción:
  - R.P. 112. “Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of buildings materials”(1999).

R.P. 122. "Practical use of the concepts of clearance and exemption. Part II: application of concepts of exemption and clearance to natural radiation sources" (2002).

- Excepciones y aclaraciones:

R.P. 135. "Effluent and dose control from European Union NORM industries. Assessment of current situation and proposal for a harmonized Community approach (2003).

En cuanto a la legislación española, existe una serie de referencias a tener en cuenta a la hora de realizar el presente estudio:

Real Decreto 1630/1992 "Disposiciones la libre circulación de productos de construcción" (1992).

Real Decreto 783/2001 "Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes" (2001).

Real Decreto 1439/2010 "Modificación del reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes" (2010).



### 3. CONTENIDOS RADIATIVOS DE LOS GRANITOS.

#### 3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS GRANITOS DE EXTREMADURA.

El contenido radiológico de los granitos, está relacionado con su génesis y por tanto con su clasificación petrográfica. La mejor forma de realizar una clasificación petrográfica de las rocas ígneas extremeñas, según su composición mineralógica, es a partir del diagrama de Streckeisen o diagrama QAPF (Streckeisen, 1974), tal y como se muestra en la figura 2.5 del capítulo 2. El acrónimo, QAPF, corresponde a Cuarzo (en inglés: Quartz), Feldespato alcalino (en inglés: Alkali feldspar), Plagioclasa, Feldespatoide. Los porcentajes de los grupos minerales utilizados para la clasificación son recalculados al 100%.

La particular geología de Extremadura, condiciona la presencia de batolitos graníticos a lo largo de toda su geografía y por tanto la existencia de explotaciones de roca ornamental en toda la Región (Figura 3.1).

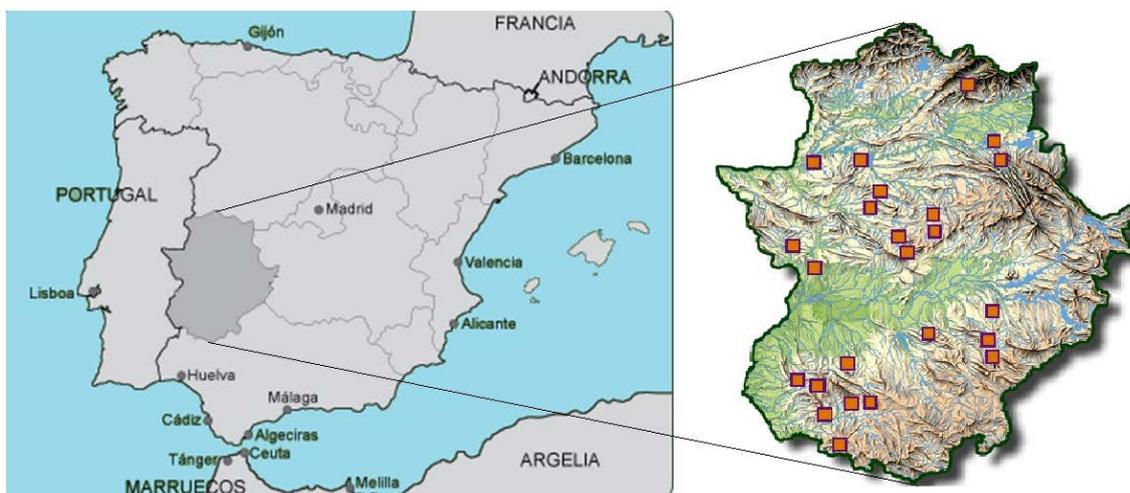


Figura 3.1: Mapa de localización de las variedades de piedra natural de Extremadura (Junta de Extremadura, 2000).

El 100 % de las rocas ígneas extremeñas estudiadas en esta Tesis, corresponden a rocas intrusivas (plutónicas), con lo que para su clasificación se hará uso exclusivo de la mitad superior del diagrama QAPF. Los datos necesarios para poder realizar la correspondiente clasificación, aparecen en los estudios petrográficos realizados por la Junta de Extremadura en su “Atlas de las Rocas Ornamentales de Extremadura” (Perianes et al, 2004).

Atendiendo a los porcentajes relativos de cada uno de los minerales constituyentes de la roca (cuarzo, feldespatos alcalinos y plagioclasas), que presentan cada uno de los granitos del estudio, se puede hacer una clasificación de los mismos dentro de un diagrama ternario (Figura 3.2).

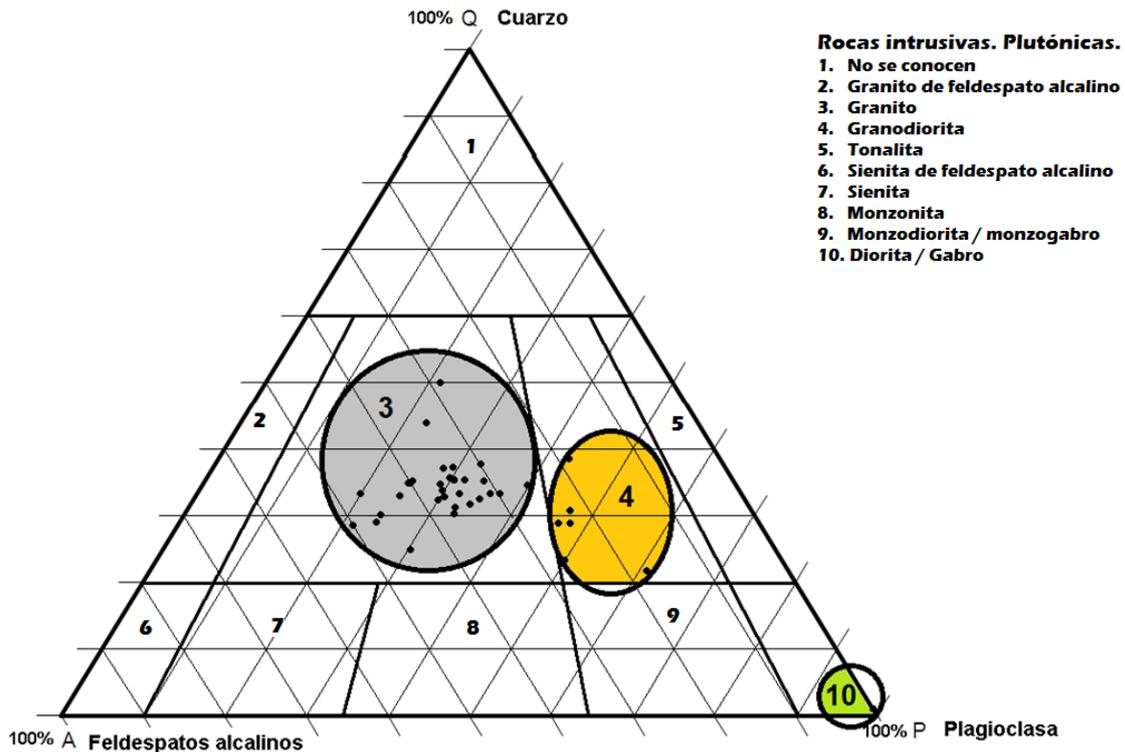


Figura 3.2: Diagrama ternario para la representación de los granitos del estudio, según el diagrama Streckeisen. Elaboración propia.

Los granitos extremeños estudiados pueden englobarse principalmente en tres campos del diagrama QAPF (Figura 3.2):

- Dentro del campo 3 (Granitos s.s.) aparecen un total de 31 granitos (76% del total), con diferentes composiciones (biotítico, moscovítico, clorítico, feldespático, etc.).
- En el campo 4 (Granodioritas) se engloban 7 variedades comerciales (17%), con un contenido mineralógico variable.
- Finalmente, en el campo 10 (Dioritas y Gabros o Diabasas) aparecen 3 materiales (7%).

La principal diferencia entre estos granitos, es el porcentaje de las plagioclasas presentes en la roca. Esta diferencia composicional lleva asociada una diferencia estética notable, ya que el aumento del porcentaje en plagioclasas, en detrimento de los otros minerales mayoritarios (cuarzos y feldespatos alcalinos) hace que los materiales adquieran tonalidades más oscuras, como se puede apreciar en la Figura 3.3.

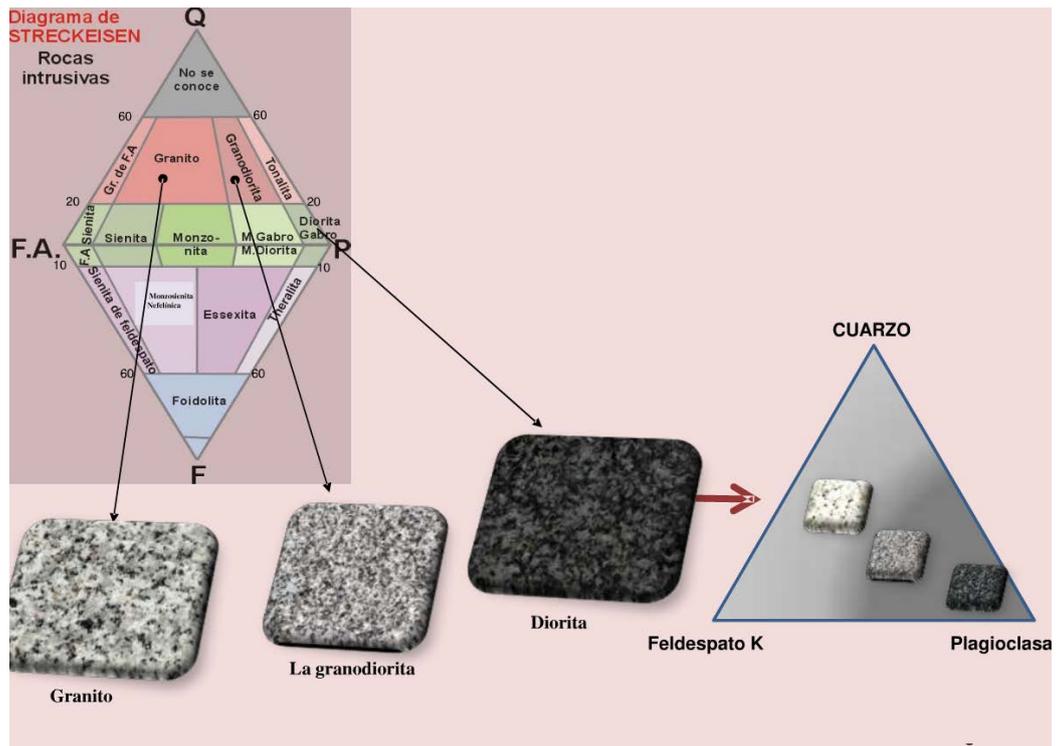


Figura 3.3: aspecto visual de las rocas intrusivas, según su clasificación en el diagrama Streckeisen.

## 3.2 CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA DE LOS GRANITOS EXTREMEÑOS.

Una parte importante del trabajo, lo componen las determinaciones radiológicas realizadas sobre las diferentes muestras de granitos ornamentales comerciales de la región extremeña, concretamente la determinación de las concentraciones de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  en los granitos estudiados.

La realización de estas analíticas permite tener una idea muy ajustada del contenido radiológico natural de estas variedades utilizadas como materiales de construcción y por tanto sujetas a una normativa y reglamentación específica, elemento clave para poder cuantificar la contribución a la dosis por irradiación externa en diferentes ambientes.

### 3.2.1 Preparación de muestras.

La preparación y el tratamiento previo de las muestras de ensayo, depende de las determinaciones a realizar, pero todas las muestras sufrieron un proceso inicial común de preparación, consistente en:

- Reducción del tamaño granulométrico de la muestra:
  - Machaqueo primario con machacadora de mandíbulas.
  - Obtención granulométrica final con molino de discos de tungsteno.
- Tamizado de la muestra utilizando la serie de tamices con las aperturas adecuadas, hasta obtener la granulometría adecuada, con tamaño de partícula comprendido entre 0,1 y 0,25 mm.

#### Determinación de los radionúclidos por espectrometría gamma.

Tras la obtención de la granulometría adecuada, las muestras de granito fueron secadas al horno durante 48 h para eliminar su humedad.

Posteriormente se procedió al encapsulado y al sellado hermético de las muestras. Para ello se procedió a introducir cada una de las muestras, en cápsulas de tipo de Petri de  $191\text{ cm}^3$ . Las cápsulas fueron perfectamente selladas para evitar la pérdida de cualquier emanación de  $^{222}\text{Rn}$ .

Después de 28 días, y una vez alcanzado el equilibrio secular del  $^{226}\text{Ra}$  con sus descendientes, las muestras se analizaron por espectrometría gamma, usando para ello un detector HPGe de 43% de eficiencia relativa, con una relación de pico-Compton de 56:1 a 1332,5 keV de emisión de  $^{60}\text{Co}$ .

Los contenidos de  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  y  $^{40}\text{K}$  se analizaron sistemáticamente en todas las muestras. El contenido de  $^{226}\text{Ra}$  se determinó en equilibrio con sus descendientes, el  $^{214}\text{Pb}$  y el  $^{214}\text{Bi}$ . El  $^{232}\text{Th}$  se asume que para las condiciones de la medida está en equilibrio con el  $^{228}\text{Ac}$ .

El tiempo estándar empleado en el análisis de cada muestra es de 24 horas.

### **Determinación del uranio.**

Las distintas muestras de granito fueron digeridas en una mezcla de ácidos, compuesta por HNO<sub>3</sub>, HCl, HF (9:3:6 mL), en un horno de microondas (Milestone Ethos Pro Ltd.) a 200°C durante 20 minutos, antes del procedimiento radioquímico correspondiente.

Después de la digestión, las muestras se evaporan hasta la obtención del residuo, al que se le añade H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, para eliminar fluoruros.

Una actividad conocida de <sup>232</sup>U es añadida con el fin de ser utilizada como trazador.

A continuación, el contenido de uranio es coprecipitado con Fe(OH)<sub>3</sub>. El precipitado se volvió a disolver en HCl 9M, seguido de la separación en una columna con resina Dowex 1x4.

El uranio se retiene en la columna, y posteriormente se diluyó con HNO<sub>3</sub> 8M.

Finalmente, las fuentes de alfa fueron preparadas por coprecipitación con NdF<sub>3</sub> (Sill, 1987).

Las espectrometrías alfa de las muestras de uranio, se llevaron a cabo usando detectores de silicio diferentes existentes en el LARUEX, con una eficacia media de 23,2% y una resolución de 38,7 keV, para una distancia fuente-detector de 6 mm.

La calidad de los diferentes procedimientos utilizados en las distintas determinaciones, está garantizada por la acreditación del laboratorio LARUEX, para llevar a cabo ensayos de radiactividad según la norma UNE-EN ISO/IEC 17025.

### **3.2.2 Contenido de radionucleidos naturales en granitos**

Existe en la geografía extremeña, una importante presencia de radionucleidos, asociados a diferentes tipos de depósitos o yacimientos: rocas ígneas (plutónicas y filonianas, muy abundantes en el dominio hercínico español), pegmatitas-aplitas, rocas metamórficas (incluyendo filones asociados), etc. El uranio, al igual que el torio, se incorpora en magmas de cristalización tardía y soluciones residuales, debido a su radio iónico grande. Esta circunstancia limita su presencia en silicatos de cristalización temprana, lo que hace que estos dos elementos se encuentren principalmente en los granitos y en las pegmatitas (Ivanovich et al, 1982).

Esta posible presencia de radionucleidos naturales en los granitos extremeños, es la que lleva en esta Tesis a la realización de una serie de determinaciones radiológicas, con el objetivo de tener una completa caracterización de los mismos.

En la tabla 3.1, aparece un resumen de los resultados obtenidos en las diferentes determinaciones por espectrometría-y de las actividades del <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th y <sup>40</sup>K, en los granitos comerciales de Extremadura (con sus correspondientes incertidumbres de recuento).

En esta tabla, junto con su clasificación geológica según el diagrama QAPF, aparece además la textura de cada una de las rocas y el batolito del que se extrae la variedad (en el caso de extraerse más de una variedad de él).

Código	Clasificación QAPF	Textura	Batolito	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)
GR-01	3	Porfídica	C. Araya	110 ± 11	66 ± 6	1300 ± 130
GR-02	3	Equigranular	C. Araya	147 ± 16	43 ± 5	1340 ± 140
GR-03	3	Equigranular		170 ± 12	57 ± 3	1100 ± 20
GR-04	4	Equigranular	Burguillos	37 ± 4	20 ± 3	510 ± 50
GR-05	4	Equigranular		21 ± 3	15,3 ± 2,3	560 ± 60
GR-06	3	Porfídica	C. Araya	172 ± 17	36 ± 4	1270 ± 130
GR-07	3	Equigranular	Plasenzuela	86 ± 9	15,1 ± 2,4	1200 ± 120
GR-08	4	Equigranular		18 ± 4	23,9 ± 2,2	800 ± 10
GR-09	3	Equigranular	Burguillos	71 ± 7	26 ± 3	1020 ± 130
GR-10	3	Porfídica		15,0 ± 1,5	88 ± 3	1630 ± 20
GR-11	4	Equigranular		5,1 ± 1,2	5,6 ± 1,5	690 ± 70
GR-12	3	Equigranular	Albalá-M.	54 ± 6	80 ± 8	1430 ± 150
GR-13	10	Equigranular		7,1 ± 0,8	7,4 ± 1,2	40 ± 10
GR-14	3	Porfídica		150 ± 15	53 ± 6	1370 ± 140
GR-15	3	Porfídica		79 ± 8	55 ± 6	1290 ± 130
GR-16	3	Porfídica	C. Araya	62 ± 6	42 ± 5	1410 ± 150
GR-17	3	Porfídica	C. Araya	71 ± 7	33 ± 4	1290 ± 130
GR-18	3	Porfídica	C. Araya	149 ± 15	48 ± 5	1210 ± 130
GR-19	3	Equigranular	Plasenzuela	79 ± 5	37 ± 3	1230 ± 20
GR-20	3	Equigranular	Plasenzuela	109 ± 11	7,9 ± 1,9	1220 ± 130
GR-21	4	Equigranular	Albalá-M.	32 ± 3	30 ± 4	710 ± 70
GR-22	3	Porfídica		128 ± 13	21 ± 3	1210 ± 130
GR-23	3	Porfídica	Gredos	100 ± 10	122 ± 12	1260 ± 130
GR-24	3	Equigranular	Albalá-M.	127 ± 12	74 ± 8	1320 ± 140
GR-25	3	Equigranular	Gredos	92 ± 10	91 ± 9	1610 ± 170
GR-26	3	Equigranular	Q. Serena	61 ± 10	54 ± 3	1120 ± 20
GR-27	3	Porfídica		167 ± 17	51 ± 6	1260 ± 130
GR-28	3	Equigranular	Albalá-M.	138 ± 14	19 ± 3	1300 ± 130
GR-29	3	Equigranular	Gredos	183 ± 18	21 ± 3	1410 ± 150
GR-30	3	Porfídica		102 ± 11	84 ± 8	1110 ± 120
GR-31	3	Equigranular	Q. Serena	77 ± 4	75 ± 3	1110 ± 20
GR-32	3	Equigranular	C. Araya	135 ± 14	30 ± 4	1260 ± 130
GR-33	10	Equigranular	Burguillos	8,4 ± 1,3	6,0 ± 1,4	550 ± 60
GR-34	3	Porfídica	C. Araya	97 ± 10	28 ± 4	1390 ± 140
GR-35	3	Porfídica	C. Araya	116 ± 12	22 ± 3	1290 ± 130
GR-36	3	Equigranular	Burguillos	43 ± 4	17,8 ± 1,7	1180 ± 20
GR-37	3	Porfídica		14,1 ± 0,9	51,3 ± 1,9	1490 ± 20
GR-38	3	Porfídica	C. Araya	39 ± 4	36 ± 4	1300 ± 140
GR-39	4	Equigranular		67 ± 7	43 ± 5	750 ± 80
GR-40	4	Equigranular	Q. Serena	85 ± 12	63 ± 9	1060 ± 110
GR-41	10	Equigranular		40 ± 6	41 ± 8	920 ± 90
Valor medio ± desviación estándar				84 ± 51	42 ± 27	1140 ± 330
Rango				5 - 183	6 - 122	37 - 1633

Tabla 3.1. Relación de valores de actividad (Bq/kg) de las muestras de granito ensayadas

Acorde con la bibliografía consultada, el  $^{40}\text{K}$  presenta la actividad específica mayor, seguido por el  $^{226}\text{Ra}$ , el uranio y el  $^{232}\text{Th}$ .

En la Tabla 2.14 del capítulo 2, aparece una extensa relación de trabajos recopilatorios de actividades específicas en materiales pétreos a lo largo de toda la geografía mundial. Los resultados de las actividades específicas de  $^{226}\text{Ra}$ , del  $^{232}\text{Th}$  y del  $^{40}\text{K}$  para los granitos analizados en el presente trabajo, presentan órdenes de magnitud similares a los valores medios de la mayoría de los trabajos antes citados. Existe una importante variabilidad en los resultados de los diferentes trabajos, producto de la complejidad geológica de los materiales analizados en cada uno de ellos.

Sin tener en cuenta los valores máximos recogidos en los trabajos de Wafaa, 2004, El-Arabi, 2007, ó Sakoda et al, 2008, considerados por los propios autores como anomalías geo-mineralógicas, los rangos de actividad en estos trabajos para el  $^{226}\text{Ra}$  varían entre 0 y 651 Bq/kg; el rango para el  $^{232}\text{Th}$  varía entre 0 y 380 Bq/kg y para el caso del  $^{40}\text{K}$  entre 1 y 2080 Bq/kg. De acuerdo a estos valores, los rangos obtenidos en esta Tesis se encuentran en la zona baja de las medidas obtenidas en los trabajos referenciados.

La actividad específica promedio y el rango (entre paréntesis), medida en suelos de todo el mundo es de 35 (17-60), 30 (11-64) y 400 (140-850), Bq/kg, respectivamente, para  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  (UNSCEAR, 2000). Como era de esperar, las actividades medias de estos radionucleidos medidos en los granitos de este trabajo, están por encima de los niveles promedio de actividad media de los suelos.

De acuerdo a trabajos realizados sobre granitos españoles (CSN, 2004), el rango de valores para los granitos españoles se encuentra entre (7,1 – 197,5), (2,4 – 132,6), y (234 - 1869) Bq/kg para el  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , y  $^{40}\text{K}$ , respectivamente, presentando los granitos extremeños valores comprendidos entre (7,1 – 143,7), (2,5 – 132,6) y (234 – 1362) Bq/kg, respectivamente. Los valores obtenidos en esta Tesis y recogidos en la tabla 3.1, se encuentran en los rangos establecidos en este documento.

Por el número de granitos analizados (un total de 137 variedades extraídas a lo largo de todo el mundo), cabe destacar el trabajo de Chen et al, 1996. En este trabajo aparece valores medios para la actividad específica del  $^{226}\text{Ra}$ , del  $^{232}\text{Th}$  y del  $^{40}\text{K}$ , de 42 (1,6 – 157), 73 (11,3-253) y 1055 (49 - 1819) Bq/kg, para cada uno de los radionucleidos. Estos valores pueden considerarse como valores ligeramente inferiores a los obtenidos en esta Tesis para el caso del  $^{226}\text{Ra}$  y del  $^{40}\text{K}$ , pero siendo ligeramente superiores para el  $^{232}\text{Th}$ , estando en cualquier caso los valores de la tabla 3.1 en estos rangos.

De la misma forma, teniendo en cuenta los valores normales de concentración de actividad recopilados en el trabajo de Mustonen et al, 1997, los valores medios obtenidos para el  $^{226}\text{Ra}$  y el  $^{40}\text{K}$  en el presente estudio se encuentran ligeramente por encima de los valores medios obtenidos para la piedra natural en dicho trabajo (60 y 640 Bq/kg, respectivamente). Por el contrario, el valor medio obtenido en el actual trabajo para el  $^{232}\text{Th}$  se encuentra ligeramente por debajo del valor recogido en antes citado trabajo (60 Bq/kg). Con respecto a los valores máximos de concentración de actividad para el  $^{226}\text{Ra}$ , el  $^{232}\text{Th}$  y el  $^{40}\text{K}$ , recogidos para la piedra natural en dicho trabajo (500, 310 y 4000 Bq/kg, respectivamente), los valores máximos de las determinaciones realizadas en el presente estudio se encuentran muy por debajo de ellos.

Con respecto al contenido en uranio de los granitos, no todos los materiales presentan los mismos contenidos, con lo que a la hora de predecir su comportamiento, se hace indispensable conocer las

actividades de este elemento para cada material seleccionado. El uranio natural está compuesto por  $^{238}\text{U}$  (99,28%),  $^{234}\text{U}$  (0,0057%), y  $^{235}\text{U}$  (0,72%).

Las determinaciones de la actividad (Bq/kg) del  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  en un total de los 26 granitos seleccionados para su estudio, fueron realizadas mediante espectrometría- $\alpha$ . Los resultados de estas analíticas aparecen recogidos en la tabla 3.2.

	Actividad (Bq/kg)		
	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
GR-2	74±11	4,7±2,1	90±13
GR-3	201±15	9,6±1,8	213±16
GR-4	26±3	0,9±0,5	26±3
GR-5	18±3	0,6±0,5	17±3
GR-6	266±23	12±2	268±24
GR-8	17±3	<0,7	15±2
GR-10	16±2	0,7±0,4	15±2
GR-11	4,6±1,4	0,3±0,3	5,8±1,4
GR-12	43±5	2,3±1,0	47±6
GR-13	5,1±1,0	0,29±0,22	5,3±1,0
GR-15	350±50	15±5	370±50
GR-16	43±4	1,3±0,7	41±4
GR-17	27±3	1,0±0,6	26±3
GR-19	46±6	2,2±1,1	50±6
GR-21	21±3	1,3±0,8	25±4
GR-23	81±14	2,9±1,9	72±13
GR-26	17±4	1,4±1,1	24±5
GR-29	380±50	19±5	404±50
GR-31	41±10	2,5±1,9	38±9
GR-33	9,4±1,7	0,5±0,4	8,3±1,6
GR-36	20±5	1,4±1,1	20±5
GR-37	13±3	<0,7	14±3
GR-38	33±4	1,9±0,8	35±4
GR-39	59±6	2,8±0,9	58±6
GR-40	66±1	5,2±2,4	65±1
GR-41	40±5	1,5±0,8	37±5
Valor medio	73	4	76
Rango	5 - 375	0,29 - 19	5 - 404

Tabla 3.2. Actividad (Bq/kg) del  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  en 26 variedades graníticas.

El valor medio para la relación  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  de los materiales analizados es de  $0,98\pm0,11$ , con rangos comprendidos entre 0,70 y 1,13. Esto sugiere que ambos radionucleidos del uranio se encuentran en equilibrio secular.

Según la RP-112 (E.C., 1999), la actividad específica media del  $^{238}\text{U}$  en la corteza terrestre es de 40 Bq/kg, valor que como era de esperar, se encuentra por debajo de los obtenidos en parte de los granitos analizados y de su valor medio final (aunque 16 de los 26 granitos estudiados presentan valores inferiores a dicha actividad).

De acuerdo con los diversos trabajos recogidos en la tabla 2.14 del capítulo 2, los valores medios, mínimos y máximos analizados sobre granitos de todo el mundo, presentan valores con órdenes de magnitud similares a los obtenidos con las analíticas aquí realizadas, a excepción de los trabajos de

Wafaa, 2004, ó Kitto, 2009, que presentan valores anormalmente elevados, debido según los propios autores, a anomalías geológicas o mineralógicas. Teniendo en cuenta la anterior salvedad, el rango de valores recogidos en estos trabajos para el  $^{238}\text{U}$  va desde 0 a 314 Bq/kg, similar al rango obtenido en el presente trabajo (5 a 404 Bq/kg), teniendo en cuenta que solo 2 valores de los analizados, están por encima de los 300 Bq/kg.

La mayor actividad de  $^{238}\text{U}$  y  $^{226}\text{Ra}$  ( $404\pm 50$  Bq/kg y  $183\pm 18$  Bq/kg, respectivamente) corresponde al granito identificado como GR-29.

Con el fin de asegurar que no existen diferencias en los resultados analíticos obtenidos, debido a la geometría del calibrado ni a la metodología analítica empleada, el contenido de  $^{226}\text{Ra}$  se determinó también, por espectrometría- $\alpha$  en varias muestras de granitos, las cuales fueron previamente disueltas completamente y analizadas según procedimiento descrito (Baeza et al, 1998).

Los resultados proporcionados por las espectrometría- $\alpha$  realizadas, están en concordancia con los obtenidos por espectrometría- $\gamma$ , como se puede comprobar en la figura 3.4.

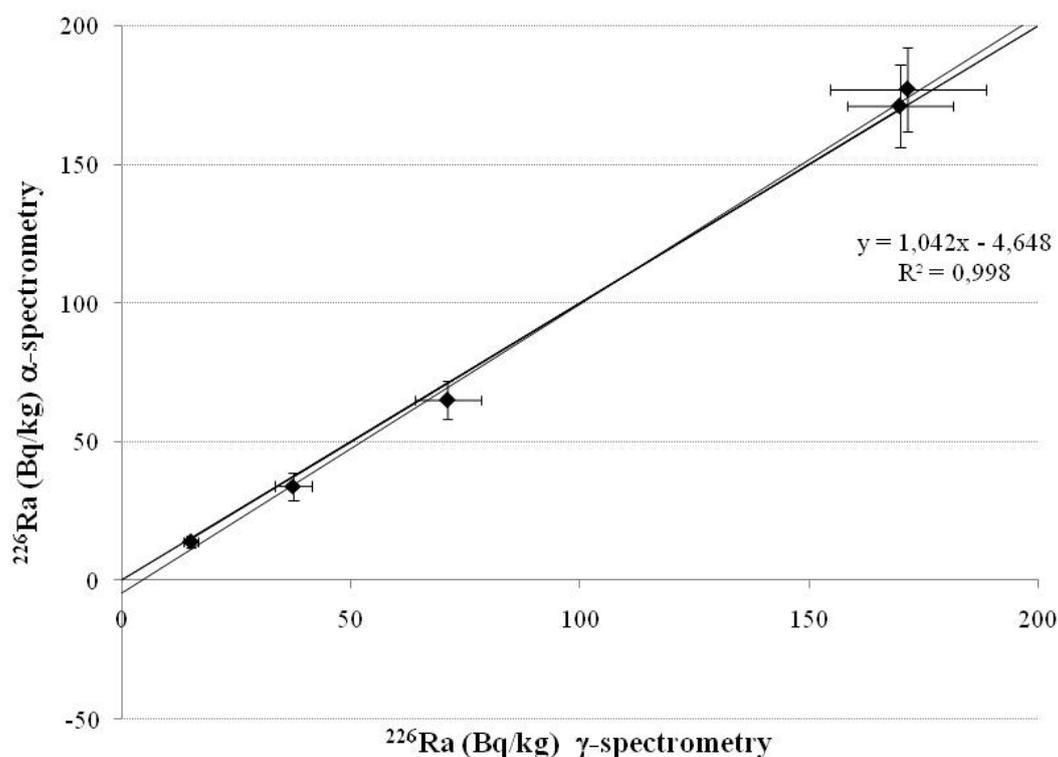


Figura 3.4: Comparativa entre los niveles de actividad de  $^{226}\text{Ra}$  en muestras de granito, determinadas por espectrometría  $\alpha$  y espectrometría  $\gamma$ .

Hay que destacar la existencia de una buena correlación entre los valores de  $^{238}\text{U}$  y  $^{226}\text{Ra}$  en las determinaciones efectuadas (coeficiente de correlación  $R=0,76$ ), como podría ser en principio esperable al ser el  $^{238}\text{U}$  el elemento cabecera de la serie radiactiva de desintegración natural del uranio-radio, figura 3.5 a).

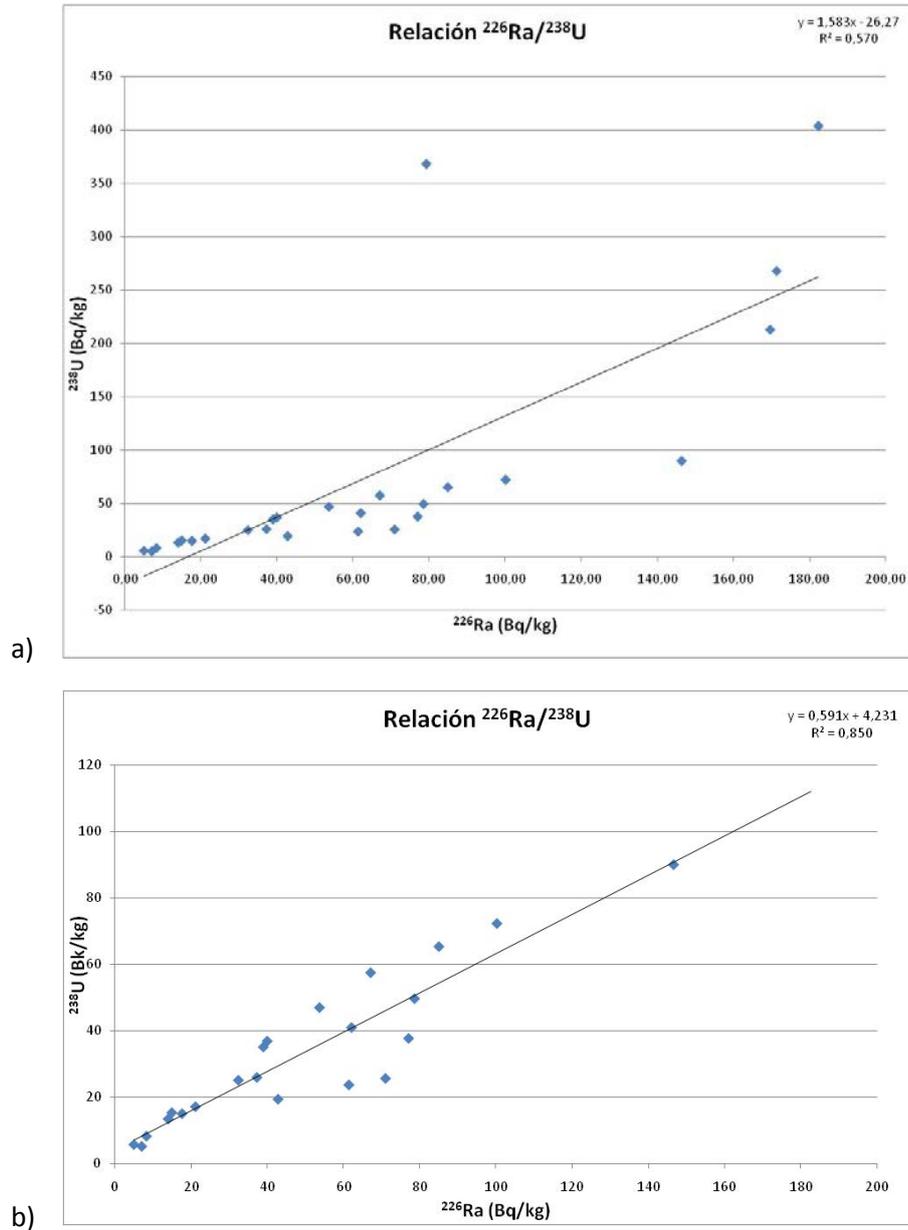


Figura 3.5: Relación  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{238}\text{U}$  de los granitos analizados: a) considerando todos los valores analizados; b) dejando de considerar 4 valores con contenidos  $^{238}\text{U}$  elevados.

En la figura 3.5 b), se observa cómo no considerando los 4 granitos con un contenido en  $^{238}\text{U}$  más elevado de los recopilados en el presente estudio, el coeficiente de correlación  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  se aproxima a la unidad, siendo éste de  $R=0,92$ . La relación  $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$  presenta una elevada variación con valores medios de  $1,3\pm 0,6$ , con rangos comprendidos entre 0,22 y 2,76, lo que da idea del diferente comportamiento de estos dos radionucleidos durante el proceso de formación de los granitos. La diferenciación mineralógica producida durante el proceso genético de formación de los granitos, tiene una influencia significativa en el contenido radiológico final de cada variedad petrográfica (Kleeman et al, 1967).

Sin embargo, la correlación entre los otros radionucleidos analizados es significativamente menor, como se puede comprobar en la figura 3.6 a) y en la figura 3.6 b), con coeficientes de correlación de  $R=0,1$  y  $R=0,3$ , respectivamente. Esto es debido a que el U y Th pertenecen a series distintas, al igual que ocurre con el U y el K.

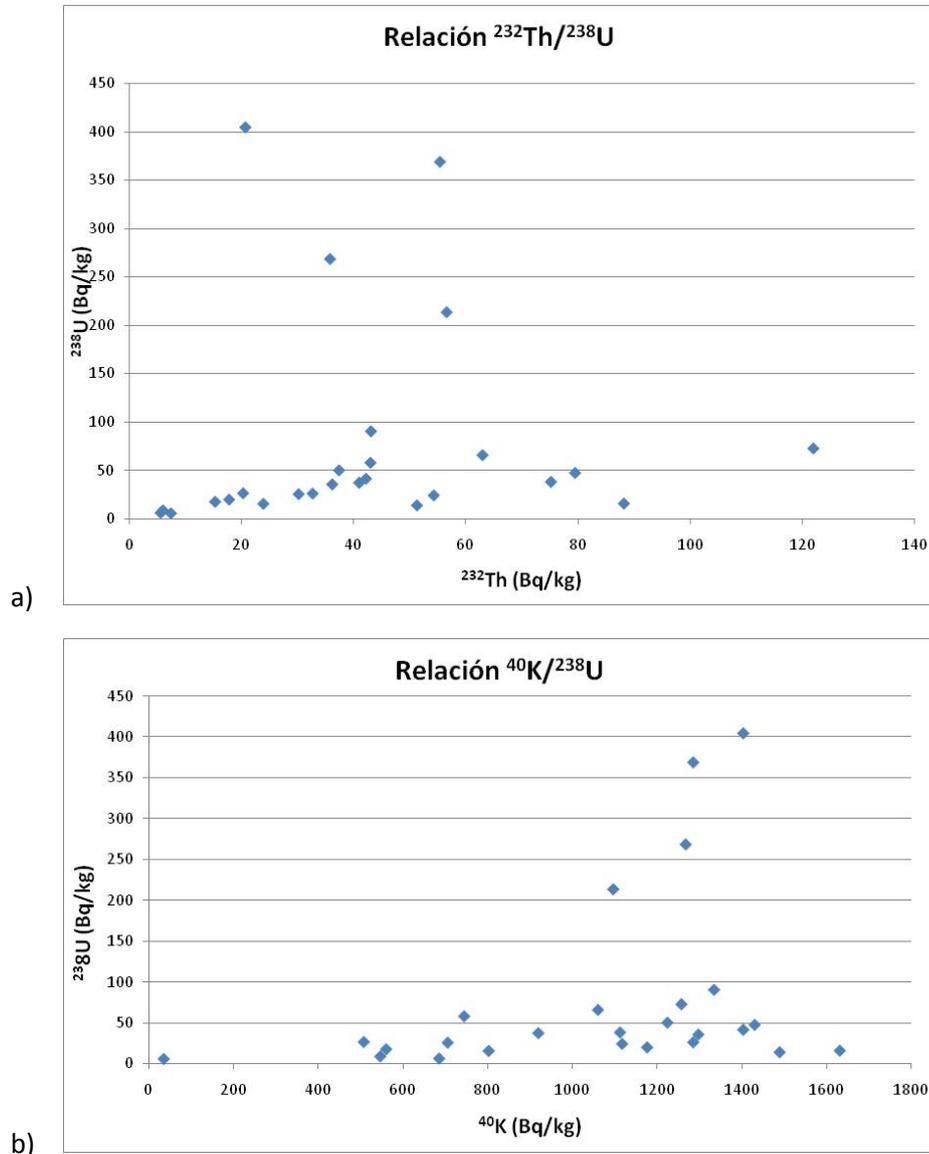


Figura 3.6: a) Relación  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ; b) relación  $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$  de los granitos estudiados.

De igual forma que en el caso anterior estudiado, los coeficientes de correlación mejoran considerablemente cuando no se consideran las cuatro variedades con mayores valores de  $^{238}\text{U}$ .

En el caso del  $^{40}\text{K}$ , como cabía de esperar, existe una clara relación entre los valores obtenidos y el contenido de feldespatos alcalinos y plagioclasas de los granitos analizados (Figura 3.7). Los granitos con altos contenidos en  $^{40}\text{K}$  tienen mayores contenidos en feldespatos alcalinos (al ser el potasio un elemento alcalino) y menores contenidos en plagioclasas. Altos niveles de actividad de  $^{40}\text{K}$  asociados a muestras con elevados contenidos en feldespato potásico, aparecen recogidos en el trabajo de El-Dine et al, 2001.

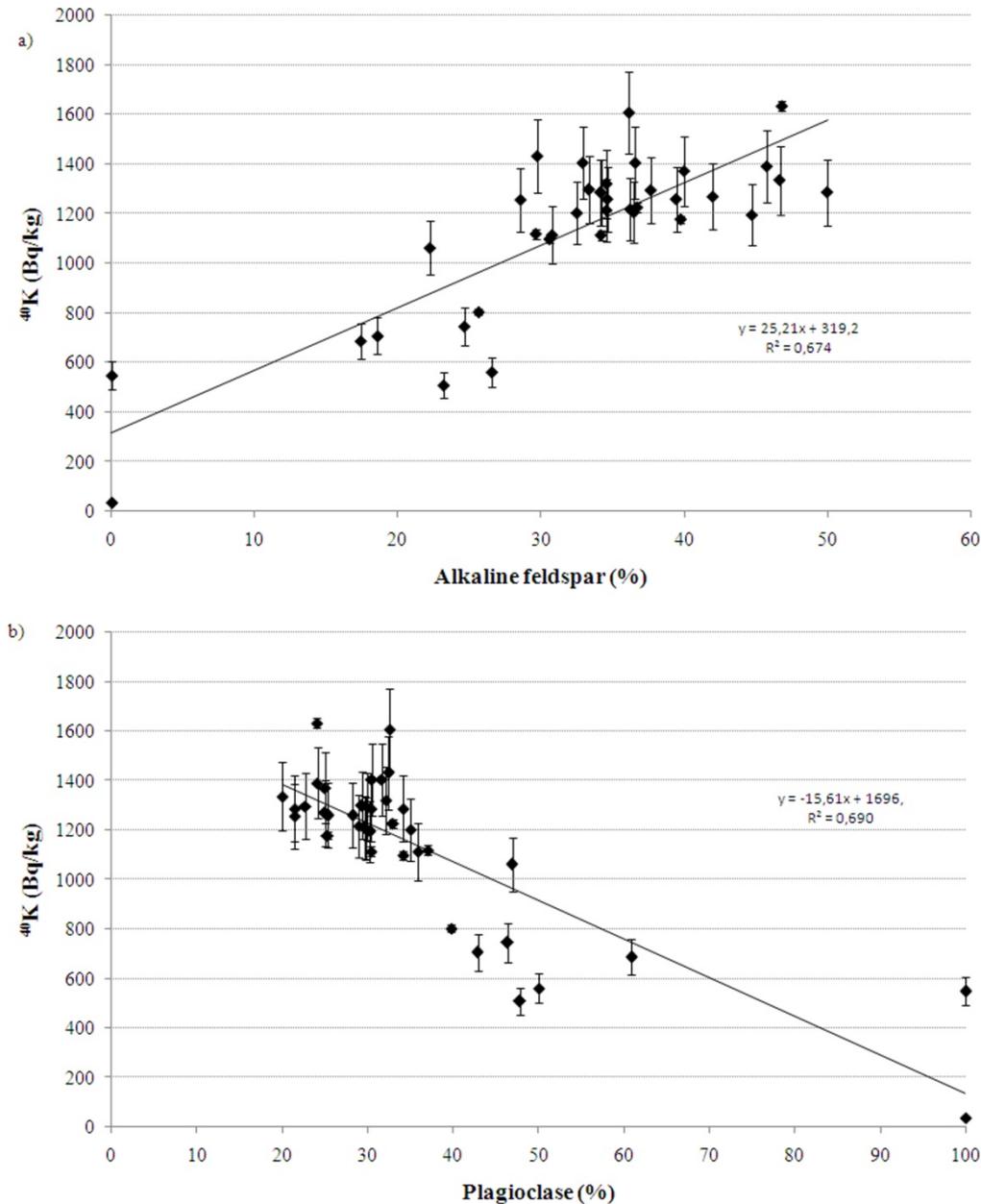


Figura 3.7: Correlación entre el contenido de  $^{40}\text{K}$ , expresado en Bq/kg, y a) el feldespato alcalino y b) el contenido en plagioclasa, expresado como porcentaje, en los granitos analizados.

### 3.2.2.1 Análisis de resultados según la clasificación petrográfica de los granitos (diagrama QAPF)

Atendiendo a la clasificación geológica de los granitos analizados, según el diagrama QAPF (Figura 3.2), los granitos propiamente dichos (grupo 3) constituyen el 76% de las muestras analizadas, seguido por los materiales granodioríticos (grupo 4) con un 17% y por las dioritas (grupo 10) con un 7%.

La tabla 3.3 recoge un resumen de los valores medios de las actividades de los diferentes elementos analizados, agrupados también de acuerdo a su clasificación petrográfica según este diagrama QAPF.

Clasificación (QAPF)	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>234</sup> U (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)
Todos	84 (5-183)	42 (6-122)	1138 (37-1633)	73 (5-375)	4 (0,29-19)	76 (5-405)
Granitos s.s Grupo-3	101 (14-122)	48 (8-122)	1293 (1098-1633)	103 (13-375)	5 (0,35-19)	108 (14-404)
Granodioritas Grupo-4	38 (5-85)	29 (6-63)	725 (509-1062)	30 (5-66)	2 (0,30-5,20)	30 (5,80-65,36)
Gabros. Grupo-10	18 (7-40)	18 (6-41)	502 (37-921)	18.28 (5,11-40,30)	0.76 (0,29-1,50)	16.83 (5,26-36,90)

Tabla 3.3: Cuadro resumen de los valores medios y rangos (entre paréntesis) de actividad, según la clasificación QAPF de los granitos.

Como queda recogido en la tabla anterior, el valor medio y el rango de la actividad del <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, y de uranio decrece en el siguiente orden: granitos s.s. (grupo 3) > granodioritas (grupo 4) > dioritas (grupo 10). Los granitos *sensu stricto* (grupo 3) son los que presentan valores de actividad mayores de entre las rocas analizadas, ya que en líneas generales presentan valores un 25% superior a la media obtenida en conjunto. Las granodioritas (grupo 4) tienen valores de actividad intermedios, aproximadamente un 50% inferior a los valores medios. Finalmente, los gabros son los que tienen menores actividades, con valores un 70% inferior al valor medio obtenido.

El rango de variación de las actividades de los granitos del grupo 3 (granitos s.s.) es mayor que el del resto de los otros grupos, atribuible en principio a un mayor contenido de minerales secundarios y accesorios que suelen asociarse al cuarzo. El contenido de <sup>40</sup>K, <sup>232</sup>Th y <sup>226</sup>Ra en estos granitos no se encuentra significativamente correlacionado. El uranio y el <sup>226</sup>Ra se encuentran bien correlacionados (R = 0,72), con un valor medio de la relación <sup>226</sup>Ra/<sup>238</sup>U de 1,38 y un rango de 0,22 a 2,76. Además, el contenido de radionucleidos en los granitos de los grupos 4 y 10, presentan entre ellos una alta correlación positiva (R > 0,61). El valor medio de la relación <sup>226</sup>Ra/<sup>238</sup>U también decrece (1,21 con rangos entre 0,87 y 1.43 para los granitos del grupo 4, y 1,14 con rangos de 1,00 a 1,35 para los del grupo 10). Esta proximidad a la unidad de la relación <sup>226</sup>Ra/<sup>238</sup>U en el caso de los granitos del grupo 3, sugiere que estos elementos se encuentran próximos a su equilibrio secular.

La composición mineralógica y por tanto, la clasificación petrográfica de los granitos (atendiendo al contenido relativo en cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa), influye significativamente en los valores de actividad de los mismos. A medida que aumentan los porcentajes de plagioclasas en la roca y por tanto disminuyen las otras componentes (cuarzo y feldespato alcalino), también disminuye la actividad de los diferentes radionucleidos analizados. Como regla general y como indica la figura 3.3, los granitos más oscuros (con mayores contenidos en plagioclasas) son los que presentan menores actividades.

### 3.2.2.2 Análisis de resultados según las texturas de los granitos

Del mismo modo y atendiendo a la textura que presentan las variedades pétreas estudiadas, se puede hacer un agrupamiento de los diferentes granitos, en dos grandes conjuntos con características texturales similares:

- Granitos con textura equigranular: son aquellos granitos cuyos componentes minerales tienen un tamaño de grano similar u homogéneo, de fino a medio (milimétrico). Dentro de este grupo pueden encuadrarse a 25 de los granitos estudiados.
- Granitos con textura porfídica: son granitos que se caracterizan por la presencia de cristales de gran tamaño (fenocristales) de tamaño centimétrico, que destacan sobre el resto de minerales de tamaño similar. Dentro de este grupo pueden encuadrarse a 16 de los granitos estudiados.

En la tabla 3.4 aparece un resumen de los resultados de los análisis efectuados a las rocas del estudio, agrupados en los dos precitados tipos texturales.

Clasificación textural	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>234</sup> U (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)
Todos	84 (5-183)	42 (6-122)	1138 (37-1633)	73 (5-375)	4 (0,29-19)	76 (5-405)
Equigranulares	76 (5-183)	36 (6-91)	1024 (37-1607)	60 (5-375)	3 (0,29-19)	64 (5-404)
Porfídicos	98 (14-172)	52 (21-122)	1317 (1114-1633)	103 (13-346)	4 (0,35-15)	105 (14-368)

Tabla 3.4: Cuadro resumen de los valores medios y rangos (entre paréntesis) de los niveles de actividad detectados, en función de la clasificación textural de los granitos.

De acuerdo con la tabla anterior, no se observa una gran variación entre los resultados de los dos grupos texturales antes definidos, aunque si una ligera mayor actividad de los granitos clasificados como de textura porfídica. Esta ligera variación puede deberse entre otros motivos, a que los granitos clasificados como gabros/dioritas (grupo 10 QAPF, que son los que presentan una menor actividad según se ha puesto de manifiesto en el apartado anterior), se encuentran agrupados dentro de los granitos equigranulares.

De esta comparativa se obtiene la conclusión de que la textura de la roca no influye en el resultado final de la actividad de la misma.

### 3.2.2.3 Análisis de resultados según la localización del batolito

Como se ha comentado en apartados y capítulos anteriores, la geología influye de forma significativa sobre el contenido radiológico final de los materiales. Circunscribiendo este estudio a la geología de la región extremeña, las unidades graníticas en Extremadura se distribuyen de Norte a Sur en diferentes batolitos (Pérez-Estaún et al, 2004), de los cuales por su interés y por el número de explotaciones que albergan destacamos los siguientes:

- Granitos procedentes del batolito de la Sierra de Gredos: Aunque la extensión de esta unidad es considerable, únicamente existen explotaciones de granito ornamental actualmente activas en el subsector del Sistema Central. En este estudio, se contemplan 3 variedades comerciales de esta zona geológico/geográfica.
- Batolito de Cabeza de Araya. Situado geográficamente al oeste y noroeste de la ciudad de Cáceres, se caracteriza por tener una gran complejidad. Sin embargo, las variedades comerciales de rocas ornamentales extraídas de él, presentan una característica común, como es su carácter porfídico. En este estudio, se contemplan 10 variedades comerciales procedentes de este batolito.
- Batolito de Plasenzuela: plutón granítico localizado en las proximidades de Trujillo de estructura circular, compuestos por granitoides calcoalcalinos. En el presente estudio se recopilan 3 variedades comerciales
- Los batolitos graníticos de Albalá-Montánchez, se encuentran geográficamente en las proximidades de las localidades de las que reciben su nombre y constituyen dos masas graníticas que intruyen discordantemente en las pizarras y en las grauvacas precámbricas. Presentan una zonación composicional que origina diferentes variedades comerciales, 4 de estas variedades son consideradas en el presente estudio.
- Batolito de Burguillos del Cerro: batolito granítico zonado, situado en la localidad del mismo nombre, se encuentra formado por sienitas, dioritas y granodioritas que intruyen en las calizas cámbricas y en los materiales precámbricos de la zona. En el presente estudio se recopilan 4 variedades comerciales.
- Batolito de Quintana de la Serena: Se trata de la apófisis noroccidental del batolito de los Pedroches, banda de rocas intrusivas ácidas de más de 350 km<sup>2</sup> de extensión, alineado según la dirección hercínica, desde el área de Quintana hasta la provincia de Jaén. De este batolito proceden 3 variedades de las analizadas en el presente trabajo.

El contenido radiológico de los granitos clasificados de acuerdo a estas unidades graníticas aparece resumido en la tabla 3.5.

Batolito	<sup>226</sup> Ra (Bq/kg)	<sup>232</sup> Th (Bq/kg)	<sup>40</sup> K (Bq/kg)	<sup>234</sup> U (Bq/kg)	<sup>235</sup> U (Bq/kg)	<sup>238</sup> U (Bq/kg)
Todos	84 (5-183)	42 (6-122)	1138 (37-1633)	73 (5-375)	4 (0,29-19)	76 (5-405)
Sierra de Gredos	125 (92-183)	78 (21-122)	1424 (1259-1607)	228 (81-375)	11 (2,87-19)	238 (71-404)
Cabeza de Araya	110 (39-172)	38 (22-66)	1303 (1206-1405)	89 (27-266)	4 (1,04-12)	92 (26-268)
Plasenzuela	91 (79-109)	20 (8-37)	1213 (1195-1226)	46	2	50
Albalá-Montánchez	88 (32-138)	51 (19-80)	1190 (707-1432)	32 (21-43)	2 (1,27-2)	36 (25-47)
Burguillos del Cerro	40 (8-71)	18 (6-26)	860 (509-1203)	18 (9-26)	1 (0,48-1)	18 (8-26)
Quintana de la Serena	74 (61-85)	64 (54-75)	1098 (1062-1119)	41 (17-66)	3 (1,38-5)	42 (24-65)

Tabla 3.5: Cuadro resumen de valores medios y rangos (entre paréntesis) de actividad, según localización.

En esta tabla se puede observar como las variedades comerciales que presentan una mayor actividad, son los granitos extraídos en el batolito de la Sierra de Gredos, dato que coincide con el presentado en el Proyecto MARNA (CSN, 2000), en cuyo mapa de radiación gamma natural a escala 1:1.000.000 (figura 2.2, del capítulo 2 y figura 3.5) se establece un máximo radiológico en la región, localizado en las proximidades de las zonas de extracción de estos materiales, con valores comprendidos entre 20 y 30  $\mu$ R/h.

En dicho mapa se observa un fondo de exposición en la comunidad de Extremadura situado en torno a 11-14  $\mu$ R/h. Además, se pueden identificar claramente los diferentes batolitos graníticos, con incrementos en radiación gamma que hacen subir estos valores hasta los 14-18  $\mu$ R/h.

La zona de menor radiación en el mapa, corresponde al batolito de Burguillos del Cerro, con valores situados entre 6 y 9  $\mu$ R/h. En esta zona es donde además se han localizado en el presente estudio los granitos de menor actividad de todos los analizados.

La figura 3.8 representa sobre el mapa del proyecto MARNA, la localización de los granitos estudiados, agrupados en los diferentes batolitos.

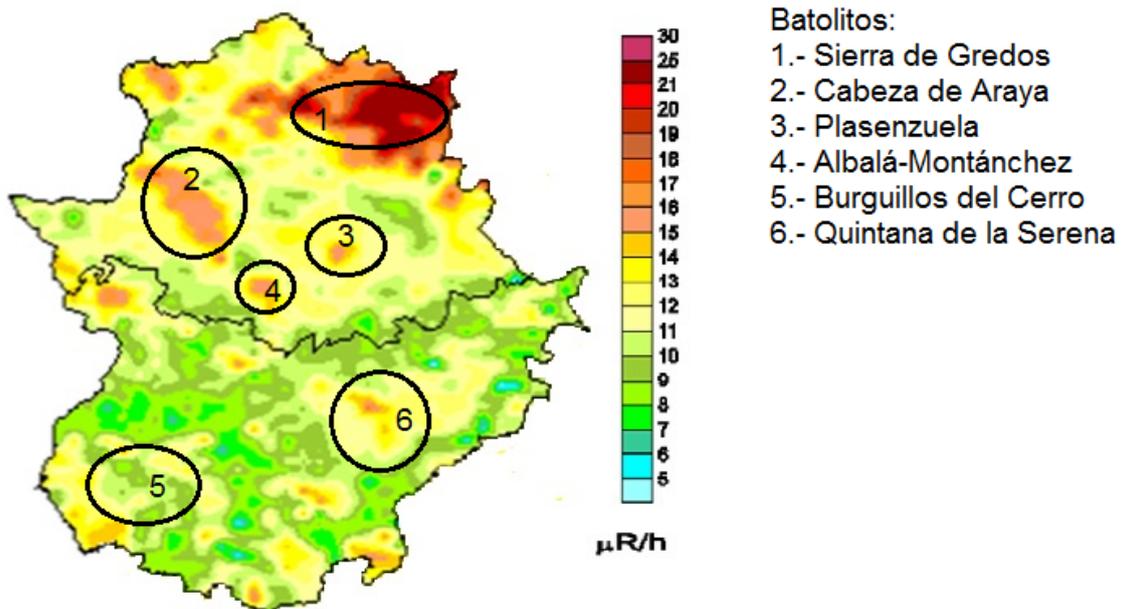


Figura 3.8: Situación de los batolitos estudiados en el mapa del proyecto MARNA (elaboración propia).

#### 3.2.2.4 Análisis de resultados de los granitos, según el tamaño de grano de la muestra analizada

Para poder analizar la influencia que la granulometría de la muestra de ensayo tiene sobre el resultado final y con el fin de comprobar la consistencia de las determinaciones efectuadas en el laboratorio, se seleccionaron dos muestras de granitos (GR-26 y GR-31) consideradas como representativas dentro del grupo 3 de la clasificación QAPF (granitos s.s), para realizar unas determinaciones complementarias en función de los diferentes tamaños de grano.

Previo a su análisis y tras el machaqueo inicial de las muestras, se procedió a un tamizado de las mismas, separando para cada una de ellas 3 granulometrías diferentes:

- Muestras con tamaño de grano inferior a 0,1 milímetros.
- Muestras con tamaño de grano comprendido entre 0,1 y 0,25 milímetros.
- Muestras con tamaño de grano mayor de 0,25 milímetros.

El resultado de estas determinaciones aparece representado en la figura 3.9.

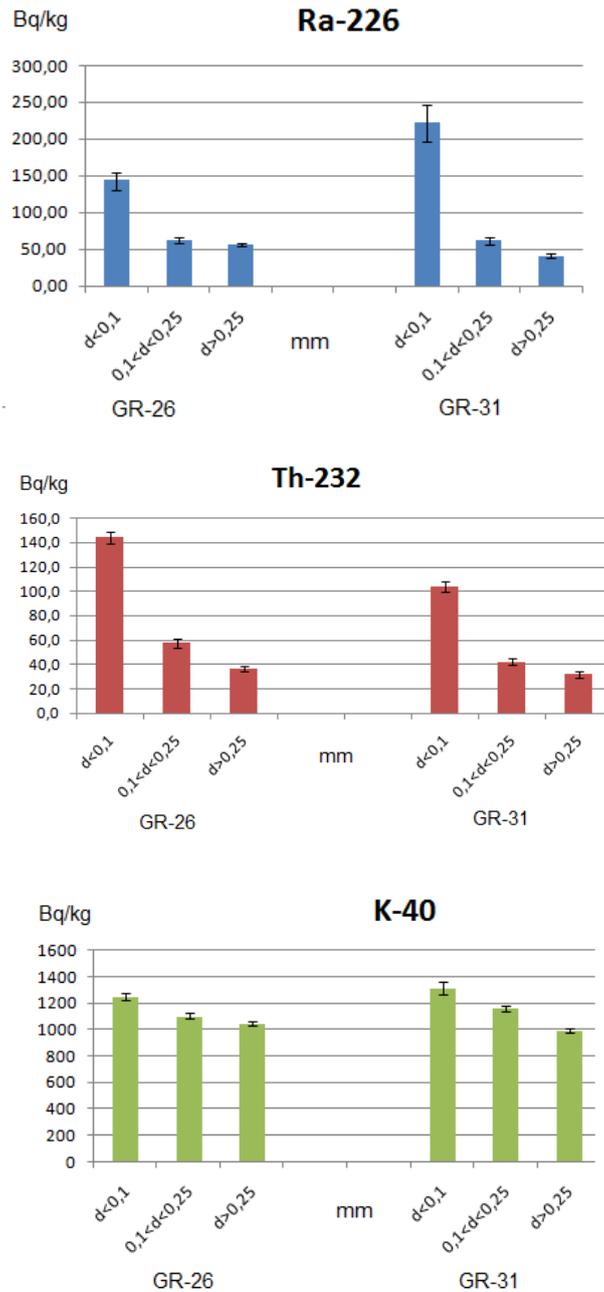


Figura 3.9: Actividad del  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  (Bq/kg) e incertidumbres, según granulometría de la muestra.

En el estudio de la evolución de las actividades obtenidas para el  $^{226}\text{Ra}$ , el  $^{232}\text{Th}$  y el  $^{40}\text{K}$  en las muestras ensayadas en función de sus diferentes granulometrías, se observa que las muestras ensayadas de granulometría más fina (por debajo de 0,1 mm) son las que presentan actividades mayores, debido a la mayor superficie específica que posee la muestra total ensayada por espectrometría- $\gamma$ .

Cabe indicar que la granulometría utilizada para el ensayo de referencia es la comprendida entre los 0,1 mm y los 0,25mm, cuya actividad como podemos observar en la figura 3.9, corresponde con un valor intermedio del obtenido en las diferentes determinaciones en función del tamaño de grano.

Por tanto, analizando los resultados obtenidos para esta comparativa, se puede señalar la existencia de una clara influencia de la granulometría final de la muestra de ensayo sobre el resultado de su actividad.

### 3.2.3 Dosis por irradiación externa

Una de las finalidades perseguidas en la determinación de los valores de las concentraciones radiactivas de los diferentes materiales graníticos, es poder identificar su riesgo potencial a la hora de ser utilizado como material de construcción, debido a su contribución a la irradiación externa. Este riesgo potencial es posible determinarlo a través de diferentes índices de riesgo radiológicos.

De entre todos los índices existentes, para este estudio han sido seleccionados aquellos considerados como los más habituales y los más referenciados en la bibliografía: Índice de Radio equivalente ( $R_{eq}$ ) e Índice de concentración de actividad gamma (I).

#### 3.2.3.1 Índice de Radio equivalente ( $R_{eq}$ )

El índice de radio equivalente ( $R_{eq}$ ), es uno de los índices de riesgo más utilizados para su aplicación en la evaluación del riesgo radiológico de los materiales de construcción que contienen isótopos radioactivos naturales del U, Th y K, a la hora de establecer límites de radiactividad admisible para su uso comercial.

Se define como la cantidad de  $^{226}\text{Ra}$  que produciría la misma dosis por irradiación externa, que la suma de las contribuciones de todas las series radiactivas, supuesto equilibrio secular (Beretka et al, 1985), según la siguiente expresión (Ecuación 3.1):

$$R_{eq} (\text{Bq/kg}) = A_{\text{Ra}} + 1,43A_{\text{Th}} + 0,077A_{\text{K}} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde  $A_{\text{Ra}}$ ,  $A_{\text{Th}}$  y  $A_{\text{K}}$  se refieren a la concentración de actividad, expresada en Bq/kg, de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , respectivamente.

La tabla 3.6 incluye un resumen de este índice para los granitos aquí analizados:

Código	Ra <sub>eq</sub> (Bq/kg)	Código	Ra <sub>eq</sub> (Bq/kg)	Código	Ra <sub>eq</sub> (Bq/kg)
GR-1	304 ± 17	GR-16	231 ± 14	GR-31	270 ± 6
GR-2	311 ± 20	GR-17	217 ± 14	GR-32	275 ± 18
GR-3	335 ± 12	GR-18	311 ± 19	GR-33	59 ± 5
GR-4	106 ± 7	GR-19	226 ± 7	GR-34	244 ± 15
GR-5	87 ± 6	GR-20	214 ± 15	GR-35	246 ± 16
GR-6	320 ± 21	GR-21	130 ± 8	GR-36	159 ± 4
GR-7	200 ± 14	GR-22	252 ± 17	GR-37	202 ± 3
GR-8	114 ± 5	GR-23	371 ± 22	GR-38	191 ± 13
GR-9	201 ± 13	GR-24	335 ± 19	GR-39	186 ± 11
GR-10	267 ± 5	GR-25	346 ± 21	GR-40	257 ± 19
GR-11	66 ± 6	GR-26	225 ± 11	GR-41	170 ± 15
GR-12	277 ± 17	GR-27	336 ± 21		
GR-13	21 ± 2	GR-28	265 ± 18		
GR-14	331 ± 20	GR-29	320 ± 22		
GR-15	258 ± 15	GR-30	307 ± 18		
Valor medio ± desviación estándar ► 233 ± 87 Bq/kg					
Rango ► 21 – 371 Bq/kg					

Tabla 3.6. Valor del índice Ra<sub>eq</sub> para las muestras de granito ensayadas

Los valores obtenidos en nuestras determinaciones se encuentran en el rango de los encontrados en la bibliografía consultada y que aparecen recogidos en la tabla 2.14 del capítulo 2.

Se asume que una actividad equivalente de radio de 370 Bq/kg en materiales de construcción producirá una exposición de alrededor de 1.5 mGy/año en la población (Krieger, 1981), valor considerado como límite máximo por la ICRP, 1977.

De acuerdo con este índice de Radio equivalente (Ra<sub>eq</sub>), los datos pertenecientes a los granitos analizados en nuestro estudio presentan un valor medio de 233 Bq/kg, valor que queda por debajo del nivel máximo de 370 Bq/kg recomendado por Beretka et al, 1985, para ser utilizado como material de construcción sin limitación de uso. Solamente uno de los granitos analizados (GR-23) presenta un valor equivalente a este límite, con un valor de 371 Bq/kg, aunque hay que tener en cuenta la incertidumbre del ensayo (± 22 Bq/kg).

Por tanto, se puede considerar en base a los resultados obtenidos para el anterior límite, que el 100% de los granitos analizados se encuentran por debajo del límite recomendado para su uso en viviendas y por tanto dentro de los rangos considerados como exentos de riesgo.

### 3.2.3.2 Determinación del Índice de concentración de actividad gamma (I)

Atendiendo a las analíticas realizadas y con los resultados obtenidos para cada uno de los granitos, una de las formas más utilizadas para determinar si un material de construcción cumple con los criterios de dosis para su utilización, es la determinación del índice de concentración de actividad gamma (I), establecido en el informe RP 112 (E.C., 1999).

Este índice "I" se deduce a partir de la actividad de los diferentes elementos para cada material a analizar, mediante la siguiente expresión (Ecuación 3.2):

$$I = \frac{C_{Ra}}{300(Bq/kg)} + \frac{C_{Th}}{200(Bq/kg)} + \frac{C_K}{3000(Bq/kg)} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde  $C_{Ra}$  es el contenido de  $^{226}\text{Ra}$  expresado en Bq/kg,  $C_{Th}$  es el contenido en  $^{232}\text{Th}$  en Bq/kg y  $C_K$  el contenido de  $^{40}\text{K}$  expresado en Bq/kg.

Según esta expresión (Ecuación 3.2) se puede establecer el índice I, para cada uno de los granitos estudiados, como aparece recogido en la siguiente tabla 3.7:

Código	Índice I	Código	Índice I	Código	Índice I
GR-1	1,1 ± 0,1	GR-15	0,97 ± 0,06	GR-29	1,2 ± 0,1
GR-2	1,2 ± 0,1	GR-16	0,89 ± 0,06	GR-30	1,1 ± 0,1
GR-3	1,2 ± 0,0	GR-17	0,83 ± 0,05	GR-31	1,00 ± 0,02
GR-4	0,40 ± 0,03	GR-18	1,1 ± 0,1	GR-32	1,0 ± 0,1
GR-5	0,34 ± 0,02	GR-19	0,86 ± 0,02	GR-33	0,24 ± 0,02
GR-6	1,2 ± 0,1	GR-20	0,81 ± 0,06	GR-34	0,93 ± 0,06
GR-7	0,76 ± 0,05	GR-21	0,49 ± 0,03	GR-35	0,93 ± 0,06
GR-8	0,45 ± 0,02	GR-22	0,94 ± 0,06	GR-36	0,63 ± 0,02
GR-9	0,77 ± 0,05	GR-23	1,4 ± 0,1	GR-37	0,80 ± 0,01
GR-10	1,04 ± 0,02	GR-24	1,2 ± 0,1	GR-38	0,74 ± 0,05
GR-11	0,27 ± 0,03	GR-25	1,3 ± 0,1	GR-39	0,69 ± 0,04
GR-12	1,1 ± 0,1	GR-26	0,85 ± 0,04	GR-40	0,95 ± 0,07
GR-13	0,07 ± 0,01	GR-27	1,2 ± 0,1	GR-41	0,65 ± 0,05
GR-14	1,2 ± 0,1	GR-28	0,99 ± 0,07		
Valor medio ± desviación estándar ► 0,87 ± 0,32					
Rango ► 0,07 – 1,4					

Tabla 3.7. Valores del índice I para cada uno de los granitos analizados.

De forma esquemática y atendiendo a los criterios seguidos y los niveles establecidos para el Índice I, según el informe RP-112 (E.C., 1999), en la tabla 3.8 se hace una clasificación de los materiales de construcción de acuerdo a su uso y contenido radiológico.

	Incremento dosis efectiva anual	
	0,3 mSv/a	1 mSv/a
Materiales utilizados de forma masiva. P. ej. Cemento	I ≤ 0,5	I ≤ 1
Materiales utilizados de forma limitada (suelos, encimeras, etc.)	I ≤ 2	I ≤ 6

Tabla 3.8: clasificación de los materiales de construcción, según su uso y contenido radiológico, RP-112 (E.C., 1999).

Dentro de la Unión Europea (E.C., 1999), dosis superiores a 1 mSv/a deben tenerse en cuenta desde el punto de vista de la protección radiológica y de la utilización de materiales. Dosis más altas pueden ser aceptadas sólo en algunos casos muy excepcionales. Es recomendable establecer restricciones o controles, cuando la dosis se encuentre en el rango de 0,3 a 1 mSv/a. Los materiales de construcción

pueden quedar exentos de toda restricción relativa a su radiactividad, si la dosis efectiva anual se encuentra por debajo de 0,3 mSv/a. Finalmente, las muestras con valores de  $I > 6$ , no puede ser recomendado para su uso en interiores de edificios.

Según esta tabla (Tabla 3.8), los materiales de construcción con un valor de  $I \leq 2$  utilizados de forma limitada en construcción (revestimiento o aplacados, encimeras, etc.) producen un incremento en la dosis efectiva anual inferior o igual a 0,3 mSv/a. Valores de  $I \leq 6$ , utilizado en las mismas condiciones, suponen un incremento de la dosis efectiva anual menor o igual a 1 mSv/año. De igual forma, cuando los materiales de construcción son utilizados de forma masiva en el proceso constructivo, un valor de  $I \leq 0,5$  supone un incremento en la dosis efectiva anual  $\leq 0,3$  mSv/a, mientras valores de  $I \leq 1$  suponen un incremento de la dosis  $\leq 1$  mSv/a.

Del análisis de los resultados obtenidos para este índice  $I$  en cada una de las variedades comerciales de granito, se puede establecer que todas las variedades analizadas presentan valores de  $I$  inferiores a 2, por lo que se podrían utilizar sin ningún tipo de restricción en revestimientos interiores, usos más habituales de los granitos extremeños. Además, gran parte de ellos, se podrían utilizar de forma masiva, teniendo en cuenta algunas consideraciones, e incluso alguno de ellos podría utilizarse de forma masiva sin restricciones.

Comparando los resultados de la tabla 3.7 con los diversos trabajos en los que se ha estudiado este índice  $I$  (tabla 2.15 del capítulo 2), se puede observar como el valor medio obtenido en el presente trabajo es inferior a casi todos los valores obtenidos en los diversos trabajos allí mencionados y coincidente con el valor de 0,9 citado en el trabajo de Baeza et al, 1992.

Los materiales de construcción son a menudo importados o exportados, con lo que una forma de clasificación del material sería beneficiosa a la hora de regular de forma armonizada, la libre circulación de mercancías. En este caso, el índice de concentración de la actividad (índice  $I$ ) podría ser utilizado como una herramienta para la identificación de materiales que pueden estar sujetos a restricciones en otros Estados miembros de la Unión Europea.

En el momento de la redacción de esta tesis, se puede consultar un documento de trabajo en la web de la Comisión Europea (E.C. EU BSS, 2009), en el que se propone un nivel de referencia de 1 mSv/año para la exposición externa procedente de los materiales construcción, en recintos cerrados.

Si un material de construcción es susceptible de deparar dosis inferiores a ese nivel de referencia (1 mSv/año), queda exento de cualquier requisito de control a nivel nacional. Además, estarán exentos de cualquier restricción en cuanto a su colocación en el mercado, en toda Unión Europea.

Si el material es susceptible de producir dosis superiores al nivel de referencia, la autoridad debe adoptar una serie de medidas de control adecuadas, que van desde el registro y la aplicación general de los códigos de construcción pertinentes, hasta las restricciones específicas sobre el uso de dicho material.

Con este fin, el índice de concentración de actividad (índice  $I$ ), podría ser utilizado para la clasificación de la materiales en cuatro clases que conducen a dos categorías de materiales de construcción (A y B), (tabla 3.9):

Uso	Categoría (dosis por defecto correspondiente)	
	A ( $\leq 1$ mSv)	B ( $> 1$ mSv)
Materiales utilizados de forma masiva o en grandes cantidades (materials used in bulk amounts)	A1 $I \leq 1$	B1 $I > 1$
Materiales superficiales y otras con uso restringido (superficial and other materials with restricted use).	A2 $I \leq 6$	B2 $I > 6$

Tabla 3.9: Clasificación y categoría de los materiales de construcción (E.C. EU BSS, 2009).

La diferencia entre uso masivo o superficial, distinción de materiales en (1) o (2), debe ser definido por el marco regulador de la UE y por la autoridad nacional competente, basado en los códigos de construcción nacionales. La información relativa a la aplicación de estos códigos de construcción debe estar disponible antes de que los materiales sean puestos en el mercado. La información pertinente debería incluir las concentraciones de radionucleidos, el índice de concentración de actividad y la clasificación correspondiente.

La revisión de la regulación va a tener en cuenta el uso real de los materiales de construcción, su espesor real y su densidad real, según el caso. Sin embargo, la filosofía de reglamentación seguirá siendo la de mantener las dosis suficientemente bajas o tan bajas como sea razonable conseguir.

El impacto sobre el grosor, para el rango que se considera en el estudio, la estimación de dosis es más o menos lineal: espesores más pequeños producen dosis más bajas. Los materiales de construcción de uso "superficial", tiene generalmente pequeños espesores con lo que estos productos podrían proceder de materias primas con concentraciones de actividad más altas de lo habitual y todavía ser autorizadas sin restricciones.

De esta forma, un material de construcción se clasifica directamente como A si el índice  $I$  es menor o igual que 1. Si el índice  $I$  es mayor que 1, también podría clasificarse como A mediante las correspondientes correcciones por densidad y espesor.

Al tener gran parte de los granitos analizados un índice  $I$  igual o inferior a 1 o muy próximo a esta cifra, esta posible modificación de las normas básicas de seguridad (BSS) implicará que todos los granitos analizados bien directamente o bien mediante una corrección por espesores o densidades, serán clasificados como A y por tanto los productos que de ellos se obtengan podrán circular sin restricciones por los países de la Unión Europea.

### 3.2.4 Radón en granitos

La presencia natural del radón a lo largo de la corteza terrestre es irregular, ya que la distribución del  $^{226}\text{Ra}$  en la superficie terrestre está relacionada con los diferentes tipos de roca existentes (Garzón Ruipérez, L., 1992).

Esta distribución desigual del uranio en la superficie, unido a factores que favorecen la circulación del radón a la superficie, provoca que las mediciones realizadas sobre terrenos graníticos, sean sensiblemente superiores a las realizadas sobre terrenos de otra naturaleza (Quindós et al., 1992).

La presencia de cantidades variables de  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{238}\text{U}$  en los materiales graníticos, hace que éstos puedan considerarse como materiales susceptibles de desprender radón en diferentes cantidades. Un objetivo importante de este trabajo ha sido determinar la cantidad de radón susceptible de escaparse de un material a la atmósfera exterior. Estas determinaciones constituyen un dato de interés, ya que permiten predecir la posible contribución de cada material analizado, a la concentración final de radón en un determinado lugar.

A nivel general, según la NTP-440 (INSHT, 2003), se estima que los materiales de construcción puedan aportar aproximadamente un 20% de la concentración total de radón en los domicilios, lo que representa una cantidad aportada comprendida entre  $10 \text{ Bq/m}^3$  y  $20 \text{ Bq/m}^3$  que, si no existieran aportaciones de radón provenientes del terreno, están muy alejadas de los valores límite aceptables de  $400 \text{ Bq/m}^3$  para edificios existentes y  $200 \text{ Bq/m}^3$  para edificios de nueva construcción, según las recomendaciones de la Comunidad Europea (Recomendación 90/143).

En la bibliografía existen diferentes metodologías para la medición de la concentración de radón, lo que hace que en muchos casos, la comparación de los resultados obtenidos deba tomarse con ciertas precauciones.

A falta de una definición detallada y unificada en la bibliografía consultada, del proceso del paso del gas radón a la atmosfera desde un material, utilizaremos estas dos definiciones para nuestro trabajo:

- Exhalación superficial (E): es la concentración de gas radón que se desprende de una superficie determinada de un material y se acumula en un recipiente acoplado de forma estanca sobre ella, expresada en  $\text{Bq m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ .
- Emanación ( $E_m$ ): es la concentración de gas radón que se desprende de un volumen determinado de un material colocado en el interior de un recipiente estanco, expresada en  $\text{Bq Kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

#### **3.2.4.1 Medidas de control de calidad. Medidas de fondo**

Con el objetivo de asegurar la calidad de los resultados obtenidos en las medidas efectuadas con el equipo Alpha-Guard y de conocer el fondo de radón existente en la sala en la que se llevaron a cabo las medidas de exhalación, se planificaron una serie de medidas a lo largo de diferentes periodos de medida.

El Alpha-GUARD es un monitor portátil para el registro continuo o instantáneo, de forma precisa y fiable de las concentraciones de radón en el aire, simultáneamente con variables como la temperatura ambiente, la humedad relativa y la presión atmosférica, mediante sensores integrados. Consiste en una cámara de ionización para detectar radón (sus dos isótopos más comunes,  $^{222}\text{Rn}$  y  $^{220}\text{Rn}$ , identificados a través de sus respectivas energías de desintegración alfa y convertidas en una salida digital).

Se realizaron un total de cinco medidas entre los meses de noviembre de 2012 y abril de 2013. Las medidas se realizaron con el equipo Alpha-Guard en periodos de 60 minutos en régimen de difusión, según se recoge en la siguiente tabla resumen (tabla 3.10).

Fecha inicio de medida	Fecha de fin de medida	Valor medio $^{222}\text{Rn}$ ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ )	Presión atmosférica media (mbar)	Temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ )	Humedad media (%)
30/11/2012 19:00:00	03/12/2012 8:00:00	$27,1 \pm 4,9$	975,1	15,9	25,0
05/12/2012 15:00:00	10/12/2012 9:00:00	$37,4 \pm 6,3$	977,9	13,2	46,3
05/01/2013 11:00:00	08/01/2013 8:00	$32,8 \pm 6,1$	986,1	14,5	35,3
04/02/2013 15:00:00	05/02/2013 10:00:00	$27,2 \pm 6,6$	984,2	16,3	33,7
26/04/2013 12:00:00	29/04/2013 7:00	$12,6 \pm 2,8$	966,3	20,7	24,0
31/10/2013 09:00	04/11/2013 09:00	$27,4 \pm 4,8$	978,5	21,4	33,5

Tabla 3.10: resumen de medidas de fondo de radón en INTROMAC.

En la siguiente figura (figura 3.10) aparece una de las gráficas obtenidas durante la determinación del fondo en uno de los periodos seleccionados (30 de noviembre a 3 de diciembre de 2012).

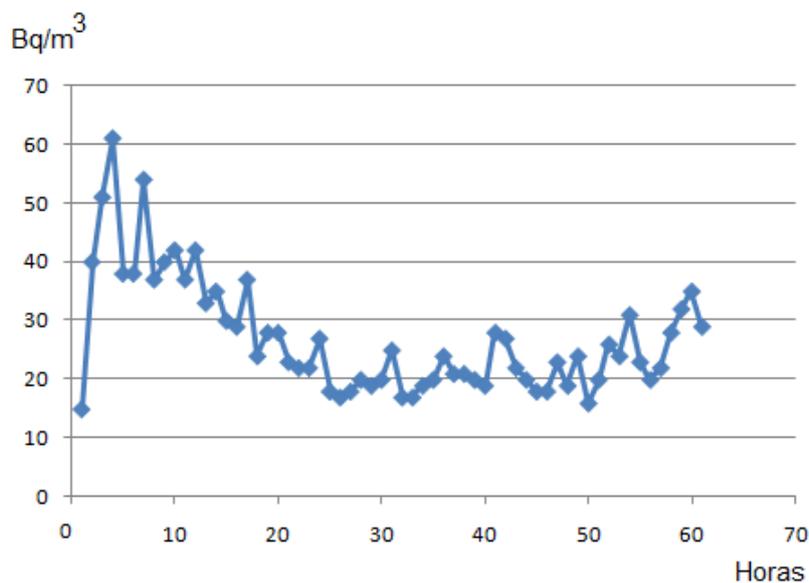


Figura 3.10. Curva de acumulación de niveles de radón en el fondo ambiental para el periodo (30 de noviembre a 3 de diciembre de 2012).

En las diferentes gráficas obtenidas durante las determinaciones de los fondos, se observa la variabilidad temporal de las mediciones durante el ciclo diario. Esta variabilidad se hace también notable en los ciclos estacionales anuales (Rowe et al, 2002), estando muy marcada por los cambios

de las condiciones meteorológicas. La comprensión de estos ciclos es necesaria para determinar los métodos de medida más adecuados para cada fin, poder comparar sus resultados y conocer la exactitud de las medias anuales estimadas, en base a cada uno de ellos. La variabilidad temporal de las mediciones durante el ciclo diario, muestra la típica fluctuación día/noche, debida a los cambios de las condiciones meteorológicas durante las horas posteriores a la puesta de sol, es decir, el cambio en la temperatura del aire provoca una diferencia de presiones en la interfase material-aire que favorece la exhalación del radón

Existen diversos estudios en España sobre la concentración de radón en interiores de edificios, en los que se establecen valores medios de concentración de radón comprendidos entre los  $34\pm 3$  Bq/m<sup>3</sup> en viviendas de la Comunidad Valenciana (Amorós R. et al, 1995), los  $49\pm 11$  Bq/m<sup>3</sup> medidos en edificios de la comunidad de Extremadura (Baeza et al, 2003), pasando por los  $41\pm 3$  Bq/m<sup>3</sup> medidos en 1555 viviendas españolas (Quindós et al, 1991).

Los resultados obtenidos en las diferentes determinaciones realizadas a lo largo del tiempo en este trabajo, ofrecen unos resultados con órdenes de magnitud similares a los valores recogidos en la bibliografía anteriormente mencionada, encontrándose próximos a los valores más bajos recogidos en dicha bibliografía.

### 3.2.4.2 Determinación de las exhalaciones superficiales

El procedimiento utilizado para la medida de la exhalación del radón, está basado y tiene en cuenta las consideraciones definidas en la norma ISO/FDIS 11665-7. Este apartado de la norma ISO, da directrices para estimar la exhalación de <sup>222</sup>Rn de una superficie determinada de granito, durante un período determinado de tiempo. Esta estimación se basa en la medición de la concentración de actividad de radón que emana de la superficie bajo investigación y que se acumula en un recipiente, con un volumen conocido, durante un tiempo dado.

La muestra de ensayo está constituida por baldosas de granito de 20 x 30 centímetros, con un espesor de 2 centímetros.

El método de medición para la estimación exhalación radón de una superficie, se basa en:

- Existencia de un depósito de acumulación del radón libre, colocado sobre la superficie del material a investigar, durante un periodo de tiempo conocido.
- El muestreo de un volumen de aire representativo del total de aire contenido en el depósito de acumulación.
- La medición de la concentración de actividad de radón en una muestra de aire.
- El cálculo de la tasa de exhalación superficie.

Previa a la realización de las determinaciones, las muestras seleccionadas fueron secadas durante 48 horas, en estufa de aire caliente a 110°C.

Las determinaciones fueron realizadas con un equipo de medición continua de radón, Alpha-Guard, acoplado a un recipiente de 5,88 litros de volumen, que se colocaba de forma estanca sobre cada

una de las superficies de las muestras analizadas. La circulación del aire/gas desde el recipiente hasta el equipo de medida, se realizaba mediante una bomba de aire (Alpha-Pump) complemento del equipo Alpha-Guard, ajustada a un caudal de 0,5 L/min, sobre una superficie de 510,7 cm<sup>2</sup>.

La estimación de la tasa de exhalación de radón para una superficie determinada se calcula a partir de los siguientes elementos:

- La variación en la concentración de la actividad de radón en el interior del depósito de acumulación, entre dos momentos determinados.
- La superficie efectiva del depósito de acumulación en contacto con la superficie objeto de investigación.
- El volumen efectivo del depósito de acumulación.

La concentración de actividad de radón en el depósito de acumulación aumenta con el tiempo, en función de la tasa de exhalación de la superficie estudiada y del volumen del depósito, influida por factores tales como una inadecuada estanqueidad (fugas) y la retrodifusión (back diffusion).

El aumento de la concentración de la actividad radón puede ser modelado mediante una función exponencial (Ecuación 3.3):

$$C(t) = \frac{\Phi \cdot S}{V \cdot \lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda t}) \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

Donde C es la concentración de actividad de radón (Bq m<sup>-3</sup>),  $\Phi$  es la tasa exhalación (Bq m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>),  $\lambda$  es la constante de decaimiento efectiva, S la superficie efectiva (m<sup>2</sup>), V el volumen efectivo (m<sup>3</sup>) y t el tiempo (s).

Considerando que la concentración inicial de actividad del radón en el recipiente al comienzo del proceso es cercana a cero, la pendiente inicial de la curva es independiente de la retrodifusión. Si además se supone que la fuga de radón en el recipiente es despreciable, la fase de acumulación puede ser aproximada a un aumento lineal de la concentración del radón según la siguiente fórmula (Ecuación 3.4):

$$C(t) = \frac{\Phi \cdot S}{V} \cdot t \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Por ello, se ha considerado para ello la zona lineal de la gráfica de la curva de exhalación ( $\Phi$ ), haciendo un ajuste de mínimos cuadrados.

### 3.2.4.2.1 Resultado de las determinaciones de las exhalaciones

La medida de la exhalación de radón en nuestro trabajo, se realizó sobre un total de 25 variedades comerciales de granitos. El acabado seleccionado para la realización de las determinaciones de exhalación en los granitos fue en todas ellas el pulido, ya que es el acabado de piedra natural que se utiliza casi en exclusividad en el interior de las viviendas (por su calidad estética, nula porosidad, facilidad de limpieza, durabilidad, etc.)

La duración final de cada una de las medidas sobre cada granito, dependió tanto de la disponibilidad del equipo (presencia de fines de semana, disponibilidad de personal,...) como del tipo de curva de exhalación obtenida (pendiente, estabilización de la medida,...). El periodo mínimo de medida para algunos granitos fue de 7 horas y el periodo máximo fue de 96 horas para el granito GR-33.

En la figura 3.11, correspondiente a la medida de exhalación del granito GR-34, se puede comprobar una típica curva de exhalación de radón, con una pendiente marcada inicial de acumulación de  $^{222}\text{Rn}$  y una fase de estabilización, con algunas variaciones debido a las diferencias diarias (día/noche).

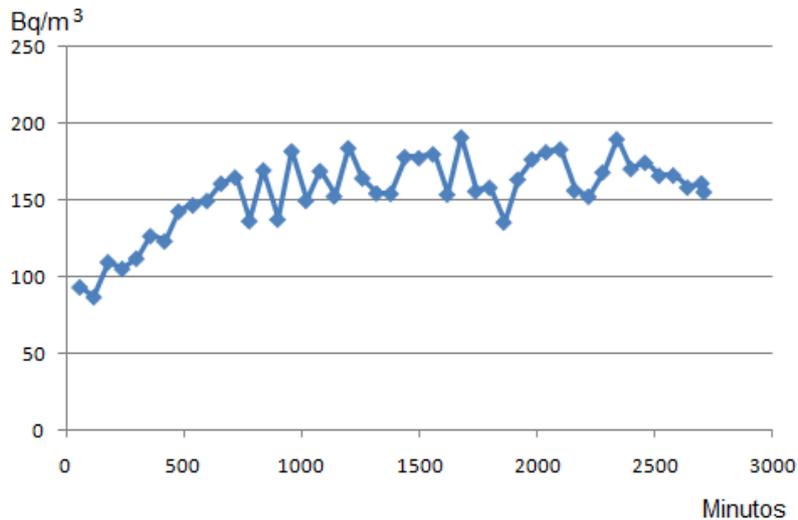


Figura 3.11: Gráfica medida de la exhalación de radón del granito GR-34 durante 45 horas.

La tabla 3.11 contiene los resultados obtenidos para la exhalación del radón de los 25 granitos seleccionados para el estudio. Para la obtención de estos valores se ha procedido a realizar en cada una de las gráficas de exhalación de  $^{222}\text{Rn}$ , un ajuste por mínimos cuadrados

Código	E (Bq m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	Código	E (Bq m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	Código	E (Bq m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )
GR-1	0,76 ± 0,17	GR-21	0,10±0,04	GR-32	2,12±0,23
GR-10	0,33 ± 0,18	GR-22	10,44±0,84	GR-33	0,086±0,047
GR-12	0,18 ± 0,03	GR-24	1,00±0,10	GR-34	5,70±0,65
GR-13	< AMD	GR-26	5,40±0,52	GR-36	3,30±0,20
GR-14	4,01 ± 0,19	GR-27	0,60±0,16	GR-38	0,40±0,038
GR-17	0,62 ± 0,21	GR-28	0,29±0,04	GR-39	0,27±0,07
GR-18	0,21 ± 0,05	GR-29	0,15±0,034	GR-40	6,38±0,93
GR-19	1,20 ± 0,19	GR-30	4,43±0,57		
GR-20	1,22 ± 0,67	GR-31	2,16±0,17		
Valor medio ► 2,15 Bq m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>					
Rango ► 0,086 – 10,44 Bq m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup>					

Tabla 3.11: valores de exhalación (Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) en los granitos analizados.

El valor medio obtenido para los granitos analizados (2,15 Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), se encuentra aproximadamente en la mitad del intervalo (0,44-3,93 Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) establecido para los 14 granitos procedentes de Brasil, analizados por Moura et al, 2011. El valor máximo obtenido en las mediciones fue de 10,44 Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, correspondiente al granito GR-22; valor que está muy por debajo del máximo (29,5 Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) recogido en un estudio sobre 50 granitos procedentes de Egipto (Wafaa, 2004).

Se han realizado diferentes intentos de correlación de las medidas de exhalación realizadas con los diferentes parámetros analizados (composición mineralógica, contenido radiológico, parámetros físico-mecánicos del granito, etc.), no detectándose ninguna correlación significativa entre ellos (figura 3.12).

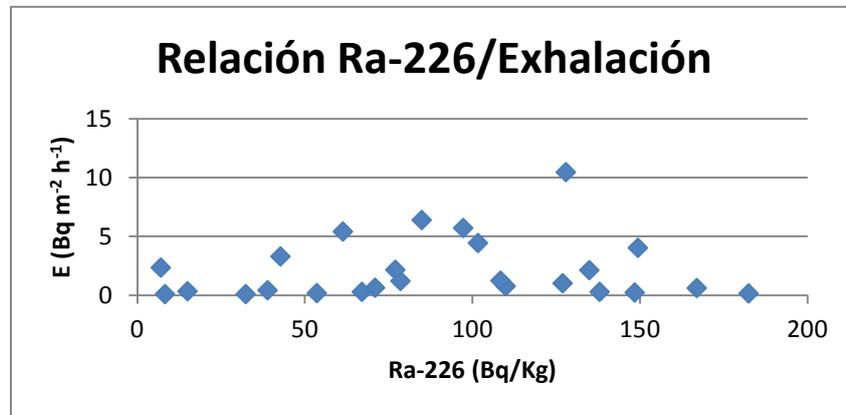


Figura 3.12: Relación entre el contenido en <sup>226</sup>Ra y la exhalación de radón.

Esto puede ser debido entre otros motivos, a que la medida de la exhalación de radón se ha realizado sobre una superficie determinada de material (con acabado pulido) y por tanto no por todo el volumen de la roca analizada, con lo que la capacidad de exhalación es menor.

Kleeman et al, 1967, estudiaron la distribución microscópica del uranio en cinco rocas mediante la técnica de trazas de fisión, revelando que los procesos geológicos pueden inducir eficazmente en una redistribución de uranio en las rocas y por tanto en la capacidad de facilitar o no la exhalación de gas radón. De hecho, el confinamiento del uranio en la red estructural de los minerales, reduce significativamente el escape del gas radón.

#### 3.2.4.2.2 Influencia de los distintos acabados sobre la exhalación de radón

Uno de los grandes atractivos que presentan las rocas ornamentales, es que pueden soportar diferentes acabados superficiales, lo que permite un cambio significativo del aspecto y textural, para una misma variedad de piedra natural.

Estos acabados superficiales apenas tienen influencia sobre el comportamiento mecánico de los materiales, a excepción de la rugosidad superficial y de la porosidad de la muestra.

Los acabados más habituales utilizados tradicionalmente para los granitos han sido analizados en este trabajo. Su utilización está condicionada, al margen de por sus connotaciones estéticas, por su lugar de colocación y uso final:

- Interiores: por su estética y facilidad de limpieza, en interiores el acabado casi exclusivo para granitos es el pulido.
  - Pulido: Se consigue mediante una secuencia de muelas rotatorias y abrasivas, de mayor a menor granulometría, sobre la superficie a tratar. La superficie obtenida es lisa y brillante, con una porosidad casi nula, que proporciona a la piedra una mayor resistencia al ataque de agentes externos.

- Exteriores: la variabilidad de acabados en exteriores es mayor y este acabado dependerá tanto de las condiciones de uso como de la estética a conseguir.
  - Corte de sierra Se consigue al cortar las piezas utilizando flejes, hilo diamantado o disco de diamante. Proporciona una superficie lisa pero algo áspera, porosa y mate, con aspecto un poco difuminado.
  - Abujardado: Se realiza sobre una superficie previamente aplanada, que se golpea repetidamente con un martillo provisto en su punta de una o varias bujardas (pequeños dientes piramidales). En función del número y tamaño de las puntas de las bujardas, la fuerza aplicada, y las repeticiones, el acabado puede quedar más grueso o más fino. El resultado es una superficie plana y rugosa, con pequeños cráteres de 1 a 3 mm de profundidad, uniformemente repartidos.
  - Flameado: Se realiza sobre una superficie previamente aplanada, a la que se aplica una lanza térmica (soplete móvil de oxipropano, con temperaturas de 900-1000°C), que provoca el desprendimiento de pequeñas lascas o esquirlas. El resultado es una superficie rugosa, algo craterizada y con un aspecto ligeramente vitrificado.

En este estudio se ha procedido a medir la rugosidad superficial de los diferentes acabados de una muestra del granito GR-31, mediante un rugosímetro Mitutoyo SJ-201. Los valores de rugosidad pueden indicarse, bien mediante los números de las clases de rugosidad correspondientes, que aparecen en la tabla siguiente (tabla 3.12), o bien mediante el valor numérico de la rugosidad ( $R_a$  media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil, en los límites de la longitud básica). Es recomendable usar preferentemente las clases de rugosidad (AENOR, 1983; ISO, 1978), en lugar de los valores reales de ésta, para evitar errores de interpretación del valor numérico.

Los resultados obtenidos en las determinaciones aquí realizadas de la rugosidad para los acabados seleccionados (pulido, aserrado, flameado y abujardo) fueron los siguientes:

Rugosidad $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Clase de rugosidad	Clasificación de los acabados medidos
50	N 12	Abujardado ( $53,4 \pm 6,9 \mu\text{m}$ )
25	N 11	Flameado ( $26,5 \pm 5,6 \mu\text{m}$ )
12.5	N 10	
6.3	N 9	Aserrado ( $5,1 \pm 2,5 \mu\text{m}$ )
3.2	N 8	
1.6	N 7	
0.8	N 6	Pulido ( $0,49 \pm 0,04 \mu\text{m}$ )
0.4	N 5	
0.2	N 4	
0.1	N 3	
0.05	N 2	
0.025	N 1	

Tabla 3.12: clasificación de la rugosidad según el resultado obtenido para cada tipo de acabado superficial analizado (AENOR, 1983; ISO, 1978).

Por regla general, el acabado pulido presenta una menor rugosidad y una gran homogeneidad a lo largo de toda la superficie, disminuyendo esta homogeneidad en los otros acabados mecánicos, en

función del operario, maquinaria utilizada, material,..., como puede observarse en la figura 3.13, obtenida a partir de la observación de la superficie de una muestra pulida y otra con ligero abujardado, en un microscopio confocal SENSO FAR PLμ 2300.

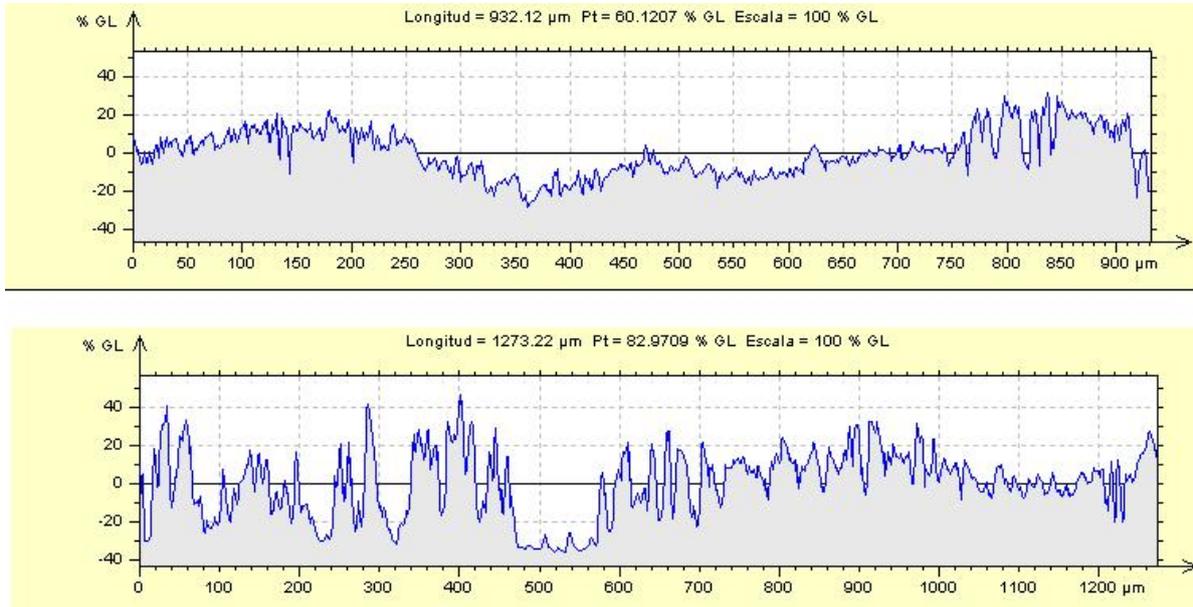


Figura 3.13: Representación de la rugosidad de la superficie pulida (superior) y abujardada (inferior) a partir del microscopio confocal. (Pt = amplitud máxima medida, %; GL = desviación sobre la rugosidad media, %).

Durante el proceso de pulido, los espacios vacíos que conforman la porosidad del granito, son rellenados por material procedente de la propia roca o de los abrasivos utilizados en el proceso. Las muestras cortadas con sierra presentan una mayor cantidad de huecos vacíos de pequeño tamaño, debido al incremento de la microfisuración durante el corte. El flameado produce por una parte una disminución de la microfisuración, la apertura de fisuras preexistentes y a la creación de pequeños microporos durante el tratamiento. En el caso del abujardado, estas variaciones son mayores y más variables, dependiendo de la intensidad del proceso.

Para ver la posible influencia del acabado superficial de una muestra de granito sobre la exhalación, se procedió a la medición de dichas exhalaciones sobre los diferentes acabados del granito GR-31.

Los resultados de estas determinaciones se resumen en la tabla 3.13:

Granito	Acabado	E (Bq m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )
GR-31	Pulido	2,2 ± 0,2
	Corte de sierra	102 ± 30
	Abujardado	138 ± 42
	Flameado	192 ± 42

Tabla 3.13: valores de exhalación (Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) para los diferentes acabados del granito GR-31.

Como era previsible, el acabado pulido es el que presenta una menor exhalación, debido principalmente al cierre de la porosidad superficial de la muestra durante el proceso mecánico de pulido. Los otros acabados analizados presentan niveles de exhalación mayores debido a la

microfisuración que se genera en la superficie del material durante el proceso de acabado. De entre ellos, los acabados “más agresivos” (los que generan una mayor rugosidad superficial, abujardado y flameado) presentan unos niveles de exhalación mayor que el del corte de sierra.

### **3.2.4.3 Determinación de las emanaciones de radón**

La determinación de la emanación de radón, según la definición del apartado 3.2.4 de este capítulo, toma como referencia el procedimiento de los trabajos realizados por Amaral et al, 2012.

Esta determinación se basa en la medición de la concentración de actividad de radón que emana de un volumen conocido de material, que se acumula en un recipiente estanco con un volumen determinado, durante un tiempo definido.

La muestra de ensayo está constituida por cubos de granitos de 7 centímetros de arista, con acabado de corte de sierra. Se analizaron un total de seis variedades de granito.

El método de medición para la estimación exhalación radón de una superficie, se basa en:

- Existencia de un depósito de acumulación del radón libre, dentro del cual se introduce el material a analizar, durante un periodo de tiempo conocido.
- El muestreo de un volumen de aire representativo del total de aire contenido en el depósito de acumulación.
- La medición de la concentración de actividad de radón en una muestra de aire.
- El cálculo de la tasa de emanación de un volumen de material.

Previa a la realización de las determinaciones, las muestras a ensayar son secadas durante 48 horas, en estufa de aire caliente a 110°C.

Las determinaciones fueron realizadas con un equipo de medición continua de radón, Alpha-Guard, acoplado a un recipiente estanco de 10,75 cm<sup>3</sup> de volumen, que contiene la muestra a analizar. La circulación del aire/gas desde el recipiente hasta el equipo de medida, se realizaba mediante una bomba de aire (Alpha-Pump) complemento del equipo Alpha-Guard, ajustada a un caudal de 0,5 L/min.

La estimación de la tasa de emanación de radón para cada material se calcula a partir de los siguientes elementos:

- La variación en la concentración de la actividad de radón en el interior del depósito de acumulación, entre dos momentos determinados.
- La masa del material analizado.
- El volumen efectivo del depósito de acumulación.

#### **3.2.4.3.1 Resultado de las determinaciones de las emanaciones**

En este trabajo se determinaron las emanaciones producidas por un total de seis variedades de granitos.

Una de las variedades selecciona, la identificada como GR-06, fue ensayada un total 5 veces con el fin de comprobar la fiabilidad de las medidas, la repetitividad y validar con ello el procedimiento utilizado (tabla 3.14).

Variedad	Fecha de ensayo	Emanación (Bq kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Presión (mbar)
GR-06 (Rep1)	25/09/2013	0,066±0,001	29±2	22±3	970±1
GR-06 (Rep2)	23/10/2013	0,069±0,003	21±1	55±3	972±1
GR-06 (Rep3)	24/10/2013	0,057±0,006	21±1	56±1	968±1
GR-06 (Rep4)	29/10/2013	0,082±0,006	19±2	33±6	979±1
GR-06 (Rep5)	04/11/2013	0,060±0,003	18±1	49±5	976±1
<b>VALOR MEDIO</b>		<b>0,067±0,002</b>	<b>22±1</b>	<b>43±4</b>	<b>973±1</b>

Tabla 3.14: Determinación de las emanaciones para la variedad identificada como GR-06.

Siguiendo el procedimiento establecido y de acuerdo con el calendario de medidas fijado, fueron determinadas las emanaciones de radón para cada una de las variedades graníticas seleccionadas (tabla 3.15).

Variedad	Emanación (Bq kg <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )
GR-06	0,067±0,002
GR-14	0,076±0,005
GR-18	0,040±0,006
GR-19	0,021±0,002
GR-23	0,027±0,004
GR-31	0,027±0,003

Tabla 3.15: Emanaciones de radón de cada una de las variedades graníticas ensayadas.

Pereira et al, 2011, en un trabajo realizado sobre un total de 9 granitos y mármoles procedentes de la Península Ibérica, establece un rango de emanaciones comprendido entre 0,003 y 0,100 Bq kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. Los valores de emanación recogidos en la tabla 3.15, se encuentran en la zona media del intervalo establecido en ese trabajo.

De igual forma Pereira et al, 2012, obtiene valores de emanación de radón para un mismo batolito granítico (dos variedades comerciales) que van desde 0,01/0,04 Bq kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> a 0,18/0,24 Bq kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>. A igualdad de contenidos uranio/radio entre las dos variedades, las diferencias de emanaciones son atribuidas a la diferencia en la distribución del uranio dentro del batolito.

Se ha podido comprobar la buena correlación existente entre el contenido en  $^{226}\text{Ra}$  de los granitos y la emanación medida. El coeficiente de correlación para estas determinaciones es  $R=0,86$  (figura 3.14).

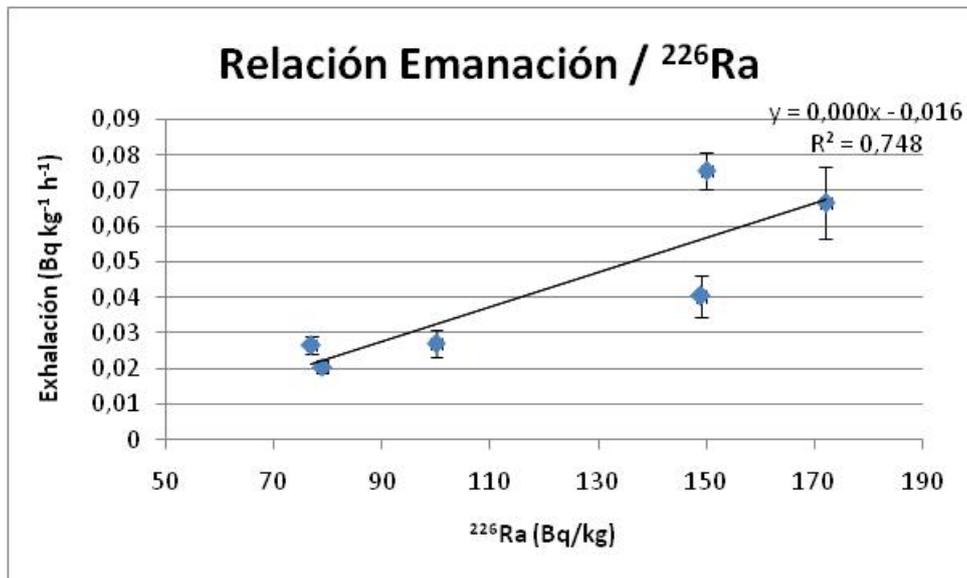


Figura 3.14: Relación entre la emanación de radón y el  $^{226}\text{Ra}$ .

Al contrario de lo que ocurre en las mediciones de la exhalación de radón del apartado 3.2.4.2.1, la emanación ha sido determinada sobre toda la superficie de la probeta cúbica con acabado de corte de sierra, que fue introducida en el depósito para su medida.

## **4. ANÁLISIS DE LAS VÍAS DE EXPOSICIÓN A RADIACIONES IONIZANTES EN LA INDUSTRIA DEL GRANITO.**

### **4.1 INTRODUCCIÓN.**

Con el fin de poder hacer un estudio detallado de la posible implicación radiológica / dosimétrica que pueda tener la actividad minero-industrial en el sector del granito, se analizó desde esa óptica la actividad en una empresa extractora y transformadora de granito, representativa de la localidad de Quintana de la Serena (Badajoz)

Quintana de la Serena agrupa a más del cincuenta por ciento de las empresas del sector de las rocas ornamentales de Extremadura, dedicándose la mayoría de estas empresas tanto a la extracción como a la elaboración y a la comercialización del granito extraído en dicha población. Gracias a este recurso, Quintana de la Serena se ha convertido en uno de los municipios de Extremadura con mayor índice industrial.

El yacimiento granítico de Quintana de la Serena, se encuentra en la concesión minera denominada “Cerro Alto”, dentro de la finca “Dehesa Boyal” de dicha localidad y que es a la vez el principal yacimiento por cantidad y calidad de piedra en el pueblo. La variedad granítica conocida como Gris Quintana se ubica en dos zonas muy concretas: la Dehesa Boyal (hoy en día concentra la mayor extracción de granito a nivel extremeño) y la Lagunilla (foco secundario ubicado al Sur de la Población). Los derechos mineros de este yacimiento pertenecen al Excelentísimo Ayuntamiento de Quintana de la Serena, que cede para su explotación los derechos mineros a la asociación profesional CANTERAS REUNIDAS A.P., para beneficio de todos los canteros de Quintana. La corporación, no obstante, mantiene la propiedad de la finca en donde se encuentra enclavada la concesión minera, percibiendo por el uso de la misma un canon anual de cada una de las empresas que la explotan.

El municipio es en la actualidad uno de los núcleos de extracción y transformación de granito más importante de España, debido a la presencia de un recurso minero de excelente calidad y a la mejora de las técnicas extractivas y de transformación del granito en empresas de la propia localidad, basadas en la introducción de nuevas tecnologías para la extracción, corte y acabado de la piedra.

El tipo de empresa que tradicionalmente ha existido en esta localidad, se correspondía con un tipo de empresa familiar, con tradición de varias generaciones dentro del Sector. Sin embargo, la introducción de las nuevas tecnologías, la mejora en la formación de trabajadores y empresarios, unido a una continua evolución de unos mercados, cada vez más globalizados y exigentes desde un punto de vista financiero, ha provocado que en los últimos años exista un importante cambio en la mentalidad y en la concepción de las empresas existentes en la actualidad en la comarca.

Los trabajos artesanales del granito en la Comarca, tenían su origen en las pequeñas explotaciones de tipo familiar, cuya capacidad productiva y expectativa de crecimiento era muy limitada. Este trabajo artesanal, gracias a la introducción de las nuevas tecnologías en el sector, desembocó en la aparición de los modernos talleres de corte con hilo y disco, además de la mejora en la capacidad y número de máquinas que trabajan en cantera, lo que ha permitido a las empresas un mejor aprovechamiento de los recursos y un óptimo nivel de transformación.

La mecanización de los talleres de elaboración ha permitido a la localidad de Quintana de la Serena, contar con más de 150 máquinas cortadoras tipo puente, de las cuales un tercio trabajan con discos

de 3 a 3,5 metros de diámetro, siendo el resto dedicadas al despiece de las planchas que se obtienen con las anteriores. Siguen existiendo los hilos de corte en taller, que hoy en día se utilizan más para cuadrar bloques o para dar cortes a piedras con medidas especiales, que para la obtención de planchones (35 unidades aproximadamente). Además, se observa un creciente interés por máquinas con control numérico, existiendo hilos de moldurar (12), máquinas de puente (3), líneas de corte robotizadas (3), etc., que permiten el desarrollo de trabajos que hasta ahora sólo se realizaban a mano, así como el trabajo en serie, consiguiendo grandes volúmenes de producción. También y para las empresas que trabajan el arte funerario, la compra de pulidoras automáticas, tornos, taladros, etc., ha supuesto un importante empuje.

Un sector tradicional como el de la labra manual, ha perdido peso en la actualidad, motivado entre otras causas por la problemática surgida por la exposición de los trabajadores al polvo que se produce durante dicha actividad, retrayendo consecuentemente a las empresas en esta parte del negocio. En este sentido, debe señalarse que actualmente es una época de profundas modificaciones legislativas que afectan al sector, sobre todo las que se dirigen a la prevención de los riesgos derivados de la actividad laboral realizada en el mismo.

Los productos más demandados, los adoquines y bordillos, han sido tradicionalmente el eje de la producción de las empresas del Sector, sin olvidar una creciente producción de losas, panteones para cementerios y otros productos de mayor valor añadido. Hoy en día, prácticamente no queda una ciudad en España, en la cual no se encuentren pavimentos realizados en Quintana de la Serena, ni cementerio que no cuente con numerosos trabajos funerarios elaborados allí.

En cuanto al trabajo en cantera, la mecanización creciente y constante de todos los procesos de extracción ha permitido la sustitución de casi todas las lanzas térmicas, ocupando su lugar los hilos de corte en cantera (más de 30 en la actualidad). Además, en estos momentos la perforación también está sufriendo un proceso de reconversión, en la que progresivamente se ve un cambio a favor de la perforación hidráulica, que permite unas mayores producciones a un menor coste y paralelamente se eliminan algunos de los problemas de la zona (exposición al polvo de sílice y al ruido).

A pesar de la considerable mejoría de las empresas de la zona, la mayoría de estas empresas son consideradas como PYMES o MICROPYMES por su tamaño. El número de trabajadores con los que cuentan las empresas puede ser variable, sufriendo variaciones al alza o a la baja, dependiendo de la actividad económica y por tanto de la carga de trabajo que tiene cada una de las empresas en un momento determinado, aunque todas las empresas suelen mantener en sus plantillas de forma continua, un número fijo de trabajadores especializados y perfectamente formados.

La jornada laboral de los trabajadores de las citadas empresas, se ajustan a las exigencias recogidas en los convenios que rigen según ley, la actividad a la que se dedican estas empresas. Esta jornada laboral es de 40 horas semanales según dicho convenio, aunque su distribución y desarrollo se adapta a las diferentes exigencias de la empresa, de los trabajadores y del tipo de tarea a desarrollar. El horario establecido por parte de las empresas, está muy condicionado por el tipo de trabajo a desarrollar, por las condiciones meteorológicas o ambientales a las que están sometidos determinados puestos de trabajo y por las horas de luz natural existente.

La industria del granito objeto de nuestro estudio, se caracteriza por utilizar casi en exclusiva como materia prima el granito, una roca que contiene por su naturaleza diferentes radionucleidos naturales ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ...), tal y como se ha visto en capítulos anteriores.

La importancia de este capítulo de la Tesis, radica en el análisis que se hace para el sector del granito, de las distintas vías de exposición a las que pueden estar sometidos los diferentes actores que en cualquier momento de la cadena productiva de esta industria, pueden estar en contacto tanto con la materia prima analizada y/o con sus subproductos, así como la posible afección medioambiental que esta actividad industrial puede ejercer. Será objeto de análisis por tanto, además de la materia prima utilizada, la radiación externa que ésta produce, la exposición al radón, los aerosoles y el agua, principales fuentes que pueden interrelacionar tanto con los trabajadores de las empresas de granito (extracción y transformación), como con el resto de la población o el medioambiente del entorno.

Esta evaluación permitirá conocer de forma fiable las condiciones laborales de los trabajadores del sector del granito y de este modo poder clasificar los lugares de trabajo según la cantidad de radiación existente, para en el caso de ser necesario, poder clasificar a los trabajadores en diferentes categorías, según sus condiciones de trabajo y en tales circunstancias poder establecer programas y/o medidas de protección radiológica que mitiguen dichas situaciones.

El sector de la piedra natural es un sector sujeto a una normativa calificable de exigente en términos de riesgos laborales por los diferentes riesgos asociados a su actividad, entre los que habría que destacar por su interrelación con nuestro estudio, la exposición de los trabajadores al polvo. La extracción y transformación del granito genera un volumen de polvo importante, que debe ser combatido por las empresas del sector, con medidas de prevención colectivas e individuales. El polvo del granito contiene una cantidad significativa de sílice, que al ser inhalada y depositada en los pulmones provoca la enfermedad conocida como silicosis.

Con respecto a poder valorar la necesidad de llevar a cabo o no la protección del público y del medio ambiente del entorno de estas actividades industriales, se establecerá como consecuencia de los estudios que se lleven a cabo y que se reflejan en el presente capítulo, tendentes a establecer los valores de los vertidos de efluentes producidos por la instalación industrial, mediante la toma y posterior análisis de muestras ambientales (aguas y aerosoles, entre otras).

## 4.2 TRABAJADORES DE LA INDUSTRIA DEL GRANITO

Con el fin de poder analizar en nuestro estudio una empresa lo suficientemente representativa de la actividad asociada al granito que se desarrolla en Quintana de la Serena, se ha seleccionado una empresa con canteras propias (dos canteras en la concesión minera de “Cerro Alto”, con diferente grado de desarrollo en su explotación), planta de transformación y una planta para la realización de trabajos de labra manual (tan importantes por tradición y calidad de los mismos, en una localidad como la de Quintana de la Serena).

En el momento de la realización del presente estudio, la empresa elegida cuenta en su plantilla con 24 trabajadores contratados. La distribución de estos trabajadores, según actividad a desarrollar y puestos a cubrir, es aproximadamente la que aparece en la tabla 4.1:

Tipo de trabajo	Nº trabajadores	Horario verano	Horario invierno
Oficina	2	Jornada partida: 09:00 a 14:00 y 16:00 a 19:00	Jornada partida: 09:00 a 14:00 y 16:00 a 19:00
Cantera	5	Jornada partida: 08:00 a 14:00 y 16:00 a 18:00	Jornada continua: 07:00 a 15:00
Planta de transformación	13	Trabajo continuo en dos turnos de 8 horas	Trabajo continuo en dos turnos de 8 horas
Taller de labra	4	Jornada partida: 08:00 a 14:00 y 16:00 a 18:00	Jornada continua: 07:00 a 15:00
<b>NÚMERO TOTAL DE TRABAJADORES: 24</b>			

Tabla 4.1: distribución de trabajadores de la empresa estudiada, por puestos de trabajo.

Hay que tener en cuenta que la distribución de trabajadores y horarios es aproximada y puede sufrir modificaciones, según las necesidades de la empresa y la época del año.

Dentro de cada empresa, cada trabajador tiene encomendada una tarea específica, sin embargo, existe una cierta permeabilidad entre las tareas a desarrollar por los trabajadores, con lo que diariamente un mismo trabajador puede desarrollar, o está en condiciones de desarrollar, diferentes tareas tanto en la propia cantera, como en la planta de transformación.

La empresa cuenta con una maquinaria de transformación, con tecnologías adaptadas a sus necesidades, entre las que se pueden destacar las recogidas en la tabla 4.2:

Cantera	Máquina de hilo diamantado para el corte
Transformación	Equipos manuales para corte, pulido, abujardado, flameado y otros trabajos. Adoquinadora 2 cortadoras de puente con disco de 3,5 m 4 Cortadoras de puente con discos de diverso diámetro Un hilo de moldura Pulidora automática Filtro prensa
Común	Maquinaria pesada para la carga de la materia prima y producto final: palas cargadoras, carretillas elevadoras, camiones, etc.

Tabla 4.2: maquinaria destacada de la empresa estudiada.

El granito extraído y procesado por esta empresa, es mayoritariamente un granito s.s. (sensu estricto), de acuerdo con el diagrama de QAPF (Streckeisen, 1974), con un contenido aproximado del 33 % de cuarzo, 34 % de feldespato alcalino y un 30% de plagioclasas, concretamente el identificado en el presente trabajo como GR-31.

La correcta identificación de los riesgos radiológicos asociados al desarrollo de la actividad minera y transformadora del granito, adquiere una importancia notable a la hora de definir con exactitud los riesgos asociados a cada actividad.

Debido a la dispersión del material radiactivo en el ambiente, los trabajadores y el público en general, pueden estar expuestos a diferentes vías de exposición naturales:

- Irradiación externa: proviene de fuentes de radiación ionizantes naturales que se encuentran fuera del cuerpo. Parte de esta irradiación proviene de la radiación cósmica y el resto de materiales radiactivos presentes en la corteza terrestre y de los materiales de construcción que nos rodean.
- Irradiación interna: es la radiación ionizante emitida por materiales radiactivos que se encuentran dentro del cuerpo. El material radiactivo natural puede penetrar en el cuerpo diariamente a través del aire que se respira, el agua y los alimentos que se consumen. Algunos ejemplos de materiales radiactivos que entran y salen diariamente del cuerpo son el radón y aquellos elementos que se encuentran en el polvo que respiramos (aerosoles).

Los trabajadores de la industria del granito están sometidos a estas diferentes vías de exposición. Las principales vías de exposición aparecen recogidas de forma resumida en la tabla 4.3.

Tipo de trabajo	Localización	Vía de exposición principal
Oficina	Interior	Radón
Cantera	Exterior	Irradiación externa Inhalación aerosoles
Planta de transformación	Interior/exterior	Irradiación externa
Taller de labra	Exterior	Inhalación aerosoles Irradiación externa

Tabla 4.3: principales vías de exposición de los trabajadores de la industria del granito.

#### 4.2.1 Irradiación externa

La exposición a estas fuentes naturales puede ser muy variable. Muchas personas pueden experimentar incrementos de la exposición a la radiación natural en sus lugares de trabajo, de ahí la importancia de los estudios previos que se realicen en esas zonas. La relevancia de la exposición a la radiación natural se confirma por el hecho de que para la mayoría de las personas, salvo excepciones, las exposiciones a la radiación natural de fondo son mucho más significativas que las exposiciones debidas a fuentes artificiales. El fondo natural de radiación forma la base sobre la que se añaden todas las demás exposiciones y es un nivel común que sirve de comparación para otras exposiciones. Los niveles de radiación oscilan dentro de un rango muy amplio, debido a las diferentes concentraciones de elementos radiactivos naturales, que presentan los diferentes terrenos, las rocas y los suelos derivados, función por tanto de la geología presente en cada zona (Proyecto MARNA. CSN, 2000).

Una de las metodologías utilizadas para llevar a cabo la evaluación de la dosis recibida por irradiación externa por los trabajadores del granito en sus diversas tareas extractivas y manufactureras, es mediante la medida dosimétrica mediante un contador proporcional.

Para la medida de la tasa de dosis por irradiación externa, se ha utilizado en el presente estudio un monitor de tasa de dosis perteneciente al laboratorio LARUEX de la Universidad de Extremadura, modelo FAG FHZ600A, que está constituido por un contador proporcional sellado y presurizado de 54,2 cm<sup>3</sup>, diseñado para medir tasas de dosis en el rango 0,005  $\mu\text{Sv h}^{-1}$  y 1  $\text{mSv h}^{-1}$ .

Este monitor de tasa de dosis ha sido calibrado con una fuente de <sup>137</sup>Cs y otra de <sup>60</sup>Co para determinar la respuesta específica del FHZ600A en las medidas ambientales (Baeza et al, 2004). La calibración y verificación del equipo de medida es realizada por un laboratorio con trazabilidad ENAC, siguiendo el plan anual de calibraciones del laboratorio.

Para el presente trabajo, las medidas in situ de tasa de dosis por irradiación externa, se realizaron en dos épocas climatológicas diferentes, haciéndolas coincidir con un periodo invernal (diciembre) y otro estival (julio).

Las determinaciones fueron llevadas a cabo tanto dentro del batolito granítico de la zona de estudio seleccionada, como fuera del mismo (para determinar la influencia del batolito granítico y el fondo ambiental de la zona que le rodea). Dentro del batolito granítico, las determinaciones fueron realizadas en áreas con posible presencia de trabajadores tanto en la zona de cantera/planta de

transformación de la empresa seleccionada, como en la zona no afectada directamente por la actividad minero-industrial del granito. La zona canterable del batolito granítico, sobre la que se instalan las empresas de extracción y transformación, ocupan una extensión aproximada de 250 ha.

La determinación del fondo ambiental de la zona que rodea la zona objeto de estudio, se realizó en un punto intermedio localizado entre las localidades de Villanueva de la Serena y la Haba (Badajoz). Estas determinaciones fueron llevadas a cabo sobre un sustrato formado por depósitos de arenas y arcillas del Mioceno (Neógeno), fuera de la zona ocupada por los diferentes cuerpos ígneos que conforman el Batolito de los Pedroches (batolito de Quintana de la Serena, batolito de Campanario, batolito de la Haba,...), figura 4.1.

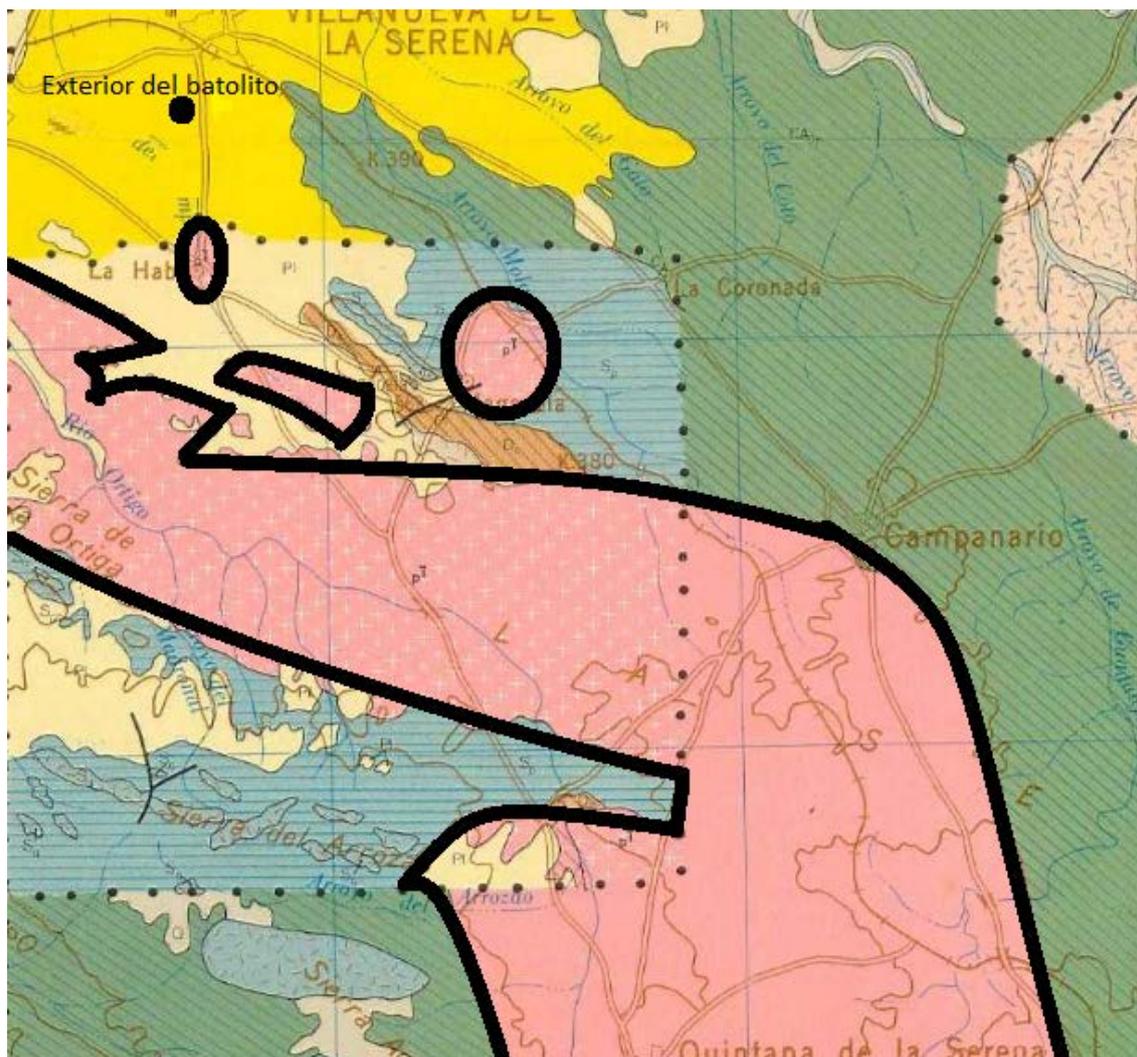


Figura 4.1. Punto para la determinación del fondo ambiental fuera del Batolito de Quintana (IGME, 1971). El batolito de Quintana de la Serena aparece en color rosado.

En este punto se realizaron 10 determinaciones en ambos periodos (20 en total) que permitió obtener una incertidumbre de medida de  $\pm 0,030$  mSv/a, utilizada para el resto de las determinaciones del trabajo.

En el batolito granítico se realizaron diferentes determinaciones en las siguientes zonas de trabajo:

- En la zona de cantera: las determinaciones se realizaron a diferentes distancias de los frentes actuales de una de las canteras, que la empresa seleccionada para el estudio tiene en explotación. Se muestrearon un total de 10 puntos en la cantera. Los valores más elevadas obtenidos, corresponden a aquellas determinaciones en las que el equipo de medida se encuentra más próximo al frente de cantera de mayor altura, situado en la zona sur de la misma, con valores máximos de 2,459 mSv/a y 2,398 mSv/a (en invierno y verano, respectivamente), figura 4.2.



Figura 4.2: Medidas de irradiación externa efectuadas en la zona de cantera (invierno/verano).

- En la planta de transformación: en ella se realizaron diferentes medidas (tanto en interior como en exterior), atendiendo a la singularidad de la instalación:
  - Exteriores de la fábrica: zonas de acopio de producto finalizado, acopio de lodos, balsas de decantación, etc.

- Zonas interiores: oficinas, vestuarios, nave de transformación, etc.

En el interior de la nave, la zona de mayor nivel de radiación externa se corresponde con la zona de la oficina (situada en una 1ª planta), local totalmente forrado de granito y con mobiliario también de granito (1,890/1,803 mSv/a, en invierno y verano, respectivamente). La mitad de la nave situada más al norte se encuentra pavimentada de cemento y presenta valores de radiación inferiores a los que presenta la zona sur de la misma, pavimentada con un enlosado de granito. En la zona exterior que rodea a la nave de transformación, la zona con valores de radiación más elevados se corresponde a la zona del acopio de producto final acabado, con valores de 2,161 mSv/a y 2,231 mSv/a (invierno/verano), figura 4.3.

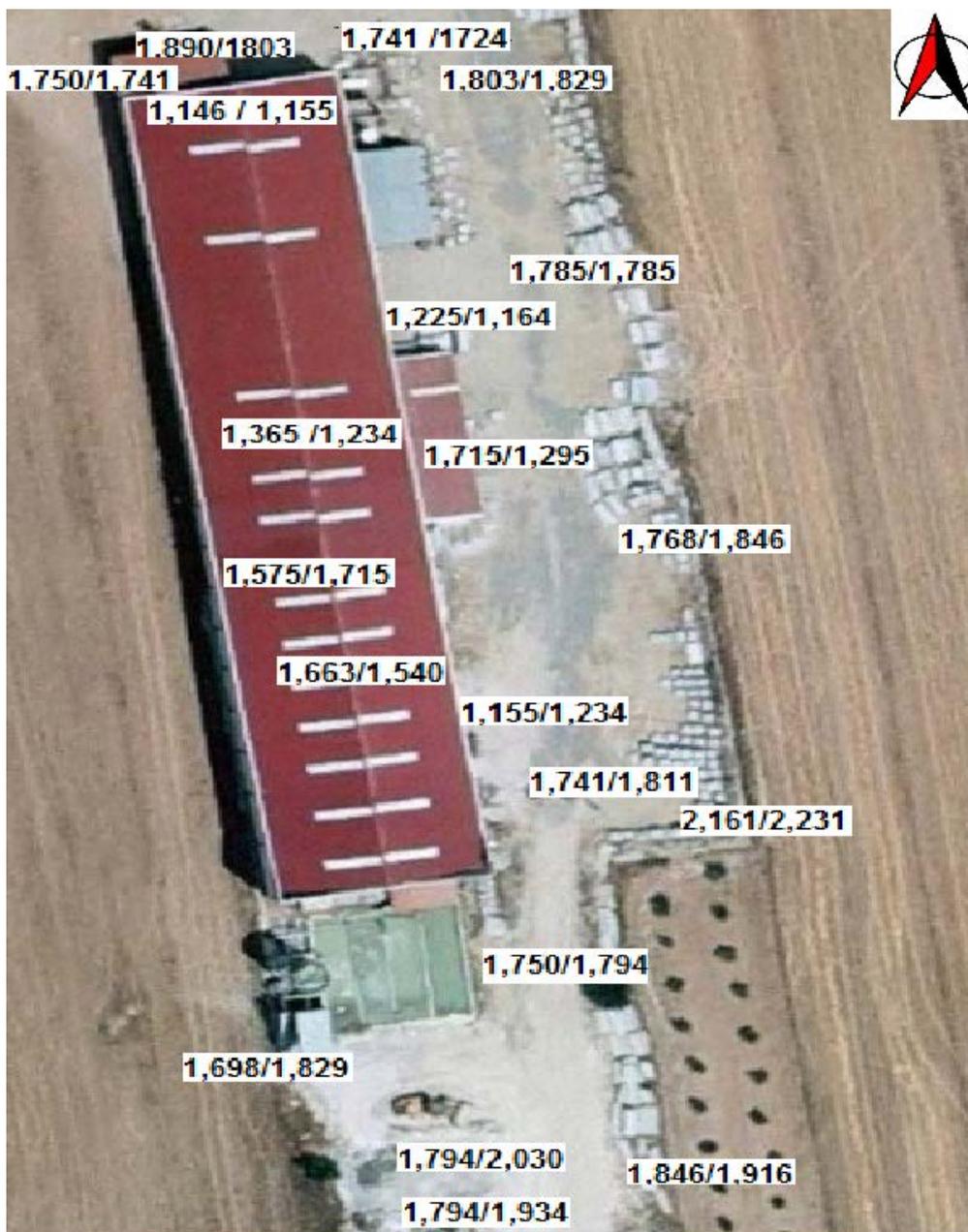


Figura 4.3: Niveles de irradiación externa medida (mSv/a) en la zona de la planta de transformación (invierno/verano).

- Zonas de labra manual: localizadas en los diferentes lugares donde se realiza la labra manual del granito. Se realizaron una serie de determinaciones, localizadas todas ellas en el exterior, excepto una (realizada en el comedor de los trabajadores). La zona de mayor radiación se encuentra localizada en la zona próxima a la utilizada para el acopio de los bloques procedentes de cantera y almacenados allí, hasta su transformación. En esta zona se sitúa la zona con los mayores valores de radiación registrados en nuestro estudio, 3,080 mSv/a y 3,141 mSv/a (invierno/verano), figura 4.4.



Figura 4.4: Niveles de irradiación externa medida (mSv/a) en la zona del taller de labra manual (invierno/verano).

- Zonas del batolito fuera de las explotaciones: localizadas tanto en el pueblo de Quintana de la Serena, en la planta de machaqueo de árido o en una zona agrícola de las proximidades. Dentro de estas zonas exteriores de las canteras, la zona con un registro más elevado corresponde a las determinaciones realizadas en el interior del propio pueblo de Quintana de la Serena, 1,912 mSv/a y 1,934 mSv/a (invierno/verano), donde la mayoría de la construcción está realizada con el propio granito extraído en la localidad.

Se realizaron por tanto un total de 110 determinaciones, distribuidas de forma homogénea entre los dos periodos de medida (55 y 55 medidas, respectivamente), con rangos de valores que aparecen resumidos en la tabla 4.4.

Localización	Rango de valores (mSv/a)	
	Invierno	Verano
Zona exterior del batolito	<b>1,330 – 1,400</b>	<b>1,435 – 1,540</b>
Zonas del batolito fuera de las explotaciones	<b>1,645 – 1,910</b>	<b>1,610 – 1,943</b>
Zona de la fábrica	<b>1,146 – 1,890</b>	<b>1,155 – 2,231</b>
Zona de la labra	<b>1,715 – 3,080</b>	<b>1,689 – 3,141</b>
Zona de cantera	<b>1,671 – 2,459</b>	<b>1,689 – 2,398</b>

Tabla 4.4: resumen de los rangos de valores obtenidos para la tasa de dosis por irradiación externa (mSv/a).

La mayoría de los resultados obtenidos en las determinaciones aquí efectuadas, tanto en las realizadas dentro del batolito como las realizadas en el exterior del mismo, se encuentran por debajo de los valores establecidos como valores medio de dosis de radiación recibidos por la población mundial de fuentes naturales, correspondiente a 2,4 mSv/a (UNSCEAR, 2000). Los valores más elevados en la zona española de la Península Ibérica, se corresponden con las formaciones ígneas de la zona del Macizo Galaico y del Sistema Central, con valores superiores a 2,63 mSv/a (Proyecto Marna, CSN, 2000).

En un primer análisis de la tabla anterior, puede comprobarse cómo los resultados obtenidos en las mediciones llevadas a cabo durante el verano son siempre ligeramente superiores a las realizadas en los mismos lugares durante la época invernal. Los niveles de tasa de dosis por irradiación externa de materiales radiactivos naturales, varían a lo largo del tiempo en cada localización, debido a los cambios que la misma experimenta en las condiciones atmosféricas (radiación solar, precipitaciones, temperatura, presión atmosférica, humedad, viento, etc.) (Schumann et al, 1992).

De forma global, los valores mínimos de radiación registrados, fueron los correspondientes a las determinaciones realizadas fuera del batolito granítico. La zona en la que se han obtenido los valores máximos de irradiación de entre todas las mediciones efectuadas, corresponde a la zona del acopio de los bloques de granito, zona situada en las proximidades de la zona de labra (3,080 mSv/a y 3,141 mSv/a, en las mediciones efectuadas en invierno y verano respectivamente). En esta zona, existía un número importante de bloques, con bloques situados hasta en cuatro alturas. Las medidas fueron realizadas en el mínimo espacio que existía entre los bloques.

Como se ha podido comprobar, en cada una de las medidas realizadas en las zonas del estudio, los valores más elevados correspondientes a cada una de estas zonas, son los que coinciden con una localización del monitor de tasa de dosis empleado más próxima a la materia prima granítica o donde existía un volumen mayor de dicho material: zona de acopios (producto final, bloques, etc.) o en la proximidad al frente de cantera. Estas zonas de mayor irradiación son zonas poco transitadas y en las que el tiempo de permanencia de los trabajadores es mínimo. Además, en estas zonas los trabajadores suelen realizar su trabajo con la ayuda de maquinaria (palas de carga, camiones, traspalé,..), que con frecuencia pueden atenuar al menos parcialmente dicha irradiación.

#### 4.2.2 Aerosoles

Uno de los principales riesgos a los que están sometidos los trabajadores del sector del granito, es la de su exposición al polvo, especialmente por el contenido en sílice respirable que este polvo en suspensión puede contener. La Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) incluyó en 1997 la sílice cristalina en la lista de sustancias carcinógenas en humanos.

No existe un valor límite de referencia idéntico de exposición al polvo para todos los países miembros de la Unión Europea. En España, el valor límite ambiental (VLA-ED) de acuerdo con la ORDEN ITC/2585/2007 (ITC2.0.02), se establece para una exposición diaria (ED) de la fracción respirable de polvo, un máximo de 3 mg/m<sup>3</sup>. La concentración de la sílice libre contenida en la fracción respirable de polvo no será superior a 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Si se tratase de cristobalita o de tridimita, este valor se reducirá a 0,05 mg/m<sup>3</sup>. En la actualidad, el valor límite está en 0,10 mg/m<sup>3</sup>, pero se prevé que en próximos años se reduzca el valor límite a 0,05 mg/m<sup>3</sup>, lo que supone una reducción del 50%.

La sílice cristalina se encuentra en la naturaleza en cantidades variables, formando parte de los materiales pétreos. Los trabajadores del sector están potencialmente expuestos al polvo que puede contener sílice cristalina respirable. No todo el polvo es igual, existen diferentes tamaños de partículas, a las que a menudo se hace referencia como fracciones de polvo. Cuando se inhala el polvo, el punto de sedimentación en el sistema respiratorio humano, depende de la gama de tamaños de partículas presentes en el polvo.

La capacidad de penetración pulmonar de las partículas de polvo, depende del tamaño (diámetro,  $\emptyset$ ) de éstas:

- $\emptyset > 100$  micras: No pueden inhalarse.
- $50 < \emptyset < 100$  micras: Se suelen retener en nariz y garganta.
- $\emptyset < 50$  micras: Penetran en los pulmones.

- $\emptyset < 5$  micras: Penetran hasta el alveolo.

Aunque por el tipo de actividad y la naturaleza del material granítico presente, cualquier trabajador puede estar potencialmente sometido a la presencia del polvo, el mayor riesgo lo presentan aquellos trabajadores que realizan labores más artesanales, mediante el uso de herramientas manuales para el corte, desbaste, labra, pulido o abujardado manual, que no siempre incorporan aporte de agua o captadores específicos de polvos, como elementos preventivos. Estas tareas manuales son llevadas a cabo sobre todo en pequeñas naves o talleres.

En la tabla 4.5 se presentan los datos procedentes del trabajo realizado por el Instituto Nacional de Silicosis en el año 2001 en toda las comunidades españolas (INS, 2001), sobre el volumen de polvo y porcentaje de sílice presente en los diferentes tipos de explotaciones minero-industriales.

COMUNIDAD	mg/m <sup>3</sup>	% SiO <sub>2</sub>
1. ANDALUCIA	1,5	4
2. ARAGÓN	2,6	3,9
3. ASTURIAS	1,5	5,1
4. BALEARES	1,5	4,6
5. CANARIAS	2,2	2,4
6. CANTABRIA	4,2	3,4
7. CASTILLA LA MANCHA	1,3	5,2
8. CASTILLA-LEON	1,7	8,4
9. CATALUÑA	1,8	4,6
10. EXTREMADURA	1,2	11,9
11. GALICIA	1,9	11,6
12. MADRID	1,2	5,9
13. MURCIA	1,1	2,1
14. NAVARRA	3,3	2,3
15. PAIS VASCO	1,3	2,6
16 VALENCIA	1,6	3,4
<b>TOTAL</b>	<b>1,6</b>	<b>5,7</b>

Tabla 4.5: volumen de polvo y % de sílice en explotaciones de las Comunidades Autónomas (INS, 2001).

Como se puede comprobar, el volumen de polvo registrado de media en las explotaciones extremeñas, es similar al presente en otras regiones y en principio, se encuentra por debajo del límite establecido por la actual reglamentación vigente (3 mg/m<sup>3</sup>). Sin embargo, el porcentaje de sílice en suspensión en las explotaciones de Extremadura, es junto al de Galicia el más elevado, debido a la particular geología de la región (con la presencia de abundantes batolitos graníticos y formaciones cuarcíticas), sobre las que se desarrolla principalmente la actividad minera. En ese trabajo no se especifica la concentración de la sílice libre contenida en la fracción respirable de polvo

(cuyo límite se establece en  $0,1 \text{ mg/m}^3$ ), otro de los factores limitantes y a controlar en el desarrollo de la actividad (INS, 2001).

Del mismo modo, en el trabajo anteriormente citado (INS, 2001), se recogen los volúmenes y porcentajes para los principales puestos de trabajo desarrollados en esta actividad minero-industrial, tabla 4.6.

PUESTO DE TRABAJO	$\text{mg/m}^3$	% $\text{SiO}_2$
Barrenista carro perforador	2,1	5
Barrenista manual	3,3	9,1
Palista de frente	1,1	4,8
Dumper de frente	1,2	4,6
Conductor de carretillas	1,7	4,8
Corte con hilo	1,4	3,5
Corte con rozadora-sierra	2	6,1
Corte en telares	1,4	8,3
Lanza térmica	1,1	10,7
Abujardado manual	5,5	10,5
Abujardado automático	1,9	8,2
Pulidora	3,5	5,9

Tabla 4.6: volumen de polvo y porcentaje de sílice por puestos de trabajo.

Los puestos de trabajo en los que no existe una presencia continua de agua para el desarrollo de su actividad, son los más expuestos al polvo y como se puede comprobar en este estudio, hay puestos de trabajo que superarían los límites establecidos por la actual reglamentación. En el caso particular de la labra manual (entre cuyas actividades se encuentra el abujardado manual), es donde se encuentran los mayores niveles de polvo. Otras de las actividades problemáticas, es el uso de la lanza térmica, aunque su utilización se encuentra actualmente en clara regresión en las explotaciones españolas de piedra natural. Las empresas y los trabajadores están obligados a trabajar en condiciones óptimas de salubridad, por lo que es necesario tomar medidas tanto colectivas (herramientas con agua, captadores de polvo,...) como individuales (máscaras, equipos de respiración,...).

Finalmente se recogen los datos procedentes de las explotaciones de los diferentes tipos de rocas ornamentales, tabla 4.7:

MATERIA PRIMA	mg/m <sup>3</sup>	%SiO <sub>2</sub>
Granito	1,8	12,8
Pizarra	2,3	13,4
Mármol	1,9	2,0

Tabla 4.7: volumen de polvo y porcentaje de sílice por tipo de roca ornamental.

Como cabe esperar, las explotaciones con materiales de naturaleza silíceo (con silicatos), son las más susceptibles de presentar los mayores valores de sílice en suspensión.

Según datos correspondientes a trabajos de campo obtenidos en campañas organizadas conjuntamente por el Instituto Nacional de Silicosis y Canteras Reunidas Asociación Profesional (2009-2010), para la medición del polvo en ambientes de trabajo en la industria del granito de Quintana de la Serena, se han medido concentraciones de polvo comprendidas entre 1,15 y 2,16 mg/m<sup>3</sup> en las zonas de perforación y entre 0,78 y 2,99 mg/m<sup>3</sup> en las zonas de labra manual y de tratamiento. Estos valores han provocado que en la mayoría de las operaciones de la minería y en el procesado de las materias primas, se toman medidas para controlar la concentración de polvo y de esta forma proteger a los trabajadores contra los riesgos asociados con el contenido de sílice en el polvo.

Con el fin de minimizar el impacto del polvo en suspensión sobre los trabajadores en las zonas de trabajo analizadas, siguiendo las recomendaciones de las empresas de prevención de riesgos laborales, las diferentes empresas de la zona ponen a disposición de sus trabajadores, además de otros medios de protección colectiva, medios de protección individual como las máscaras de protección específicas. Las máscaras de protección utilizadas cumplen con lo especificado en la norma UNE-EN 136 (AENOR, 1998) y son seleccionadas de acuerdo con el valor límite ambiental de exposición diaria (VLA-ED) y la protección recomendada para el puesto de trabajo. Así las máscaras utilizadas son máscaras para partículas de tipo FFP3 (VLA≤0,1 mg/m<sup>3</sup>), que protegen eficientemente contra partículas sólidas y líquidas de alérgenos, filtrando hasta el 99% de las partículas mayores de 1 micra.

Debido a que la progenie de elementos radiactivos naturales a menudo puede encontrarse contenida en el polvo (dependiendo del tamaño), al respirar el polvo, estos radionucleidos pueden depositarse en los pulmones y suministrar una dosis de irradiación interna al tejido pulmonar. El mayor peligro para los aerosoles de uranio inhalados, se encuentra en tamaños de partícula de 0,5-0,6 µm (ICRP-66, 1994)

Por la importancia que presenta el polvo en este sector, se procedió a realizar una analítica de la fracción de polvo presente en la actividad, con el fin de determinar su contenido radiológico. Como se ha podido comprobar, los trabajadores más expuestos a la exposición al polvo, son los que realizan su actividad en los talleres de labra, motivo por el cual la toma de muestras se centró en esta zona de las instalaciones de la empresa seleccionada para el estudio.

Las empresas de la zona tienen equipos de captación de polvo en los lugares de labra manual, con el fin de minimizar su impacto a los trabajadores. Las muestras analizadas en el presente trabajo procedían de los depósitos que la máquina captadora de polvo que dichos equipos tienen para el almacenamiento del mismo (figura 4.5).



Figura 4.5: instalaciones para la captación de polvo en el taller de labra manual.

La toma de muestras de polvo para su análisis, procedente de la transformación del granito en el taller de labra manual, fue realizada en junio de 2012.

Previo a la realización de las determinaciones radiológicas, se llevó a cabo una preparación de la muestra, ya que la fracción más interesante para su análisis era la fracción de polvo que se encontraba por debajo de 50 micras (aquella que puede penetrar en los pulmones).

Para obtener la muestra de ensayo necesaria (200 gramos) se procedió a una reducción por cuarteo del material recolectado y a un tamizado por corriente de aire.

El 63 % del material recogido en el captador industrial del polvo, se encontraba por debajo de la fracción 0,045 mm y por tanto material susceptible de ser inhalado por el trabajador.

Las determinaciones de la actividad (Bq/kg) para los diferentes radionúclidos en la fracción de polvo inferior a 45 $\mu$ m, fueron realizadas mediante espectrometría- $\alpha$ . Los resultados de estas analíticas aparecen recogidos en la tabla 4.8.

A la hora de realizar una estimación de la potencial dosis de radiación interna a la que pueden estar sometidos los trabajadores del granito de la empresa del estudio, se ha procedido al cálculo de esta dosis efectiva utilizando la ecuación 4.1. Para la aplicación de esta metodología simplificada y manteniendo un criterio conservador (del lado de la prevención), se parte de una serie de premisas: las series del uranio y del torio se encuentran en equilibrio, el tamaño de partícula de polvo utilizado es de 5  $\mu$ m, todo el polvo que se respira procede del granito, el trabajador no utiliza medios de protección, el límite de exposición al polvo permitido por la reglamentación vigente es de 3 mg m<sup>-3</sup>

(ITC2.0.02), la jornada de trabajo establecida es de 8h (2.000h/a) y el volumen de aire respirado en la misma es de  $1,2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (es decir,  $2.400 \text{ m}^3$ ).

$$\text{Dosis de radiación (mSv/a)} = \sum A \times d \times V \times e \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Siendo:

A: Actividad del radionucleido (Bq/kg).

d: Exposición al polvo permitido ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

V: Volumen anual de aire respirado ( $\text{m}^3/\text{a}$ ).

e: Factor de conversión de dosis, DCF. ICRP-119. (mSv/Bq).

De acuerdo con las anteriores premisas, se obtienen los niveles de la dosis de radiación anual de cada radionucleido y del total de ellos, considerando trabajadores con una jornada laboral de 8 horas (tabla 4.8).

Radionucleido	Actividad (Bq/kg)	Concentración máxima polvo ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	Volumen anual de aire respirado ( $\text{m}^3/\text{a}$ )	DCF. ICRP-119 (mSv/Bq)	Dosis de radiación anual (mSv/a)
$^{234}\text{U}$	138±23	3	2.400	6,80E-03	6,76E-03
$^{235}\text{U}$	4,8±2,6			6,10E-03	2,11E-04
$^{238}\text{U}$	141±24			5,70E-03	5,79E-03
$^{226}\text{Ra}$	159±18			2,20E-03	2,52E-03
$^{210}\text{Po}$	119±24			2,20E-03	1,88E-03
$^{228}\text{Th}$	91,5±7,9			2,50E-02	1,65E-02
$^{230}\text{Th}$	135±11			7,20E-03	7,00E-03
$^{232}\text{Th}$	85,9±7,5			1,20E-02	7,42E-03
$^{40}\text{K}$	1312±45			3,00E-06	2,83E-05
<b>Dosis de radiación anual (mSv/a)</b>					<b>0,048±0,006</b>

Tabla 4.8: Dosis de irradiación interna anual para cada radionucleido y para el total de ellos. Fracción de polvo analizada, inferior a  $45\mu\text{m}$ .

De acuerdo a estos cálculos y como se puede comprobar en la figura 4.6, el  $^{228}\text{Th}$  es el radionucleido que mayor contribución tiene en la dosis de irradiación interna. El  $^{40}\text{K}$  del polvo analizado, a pesar de presentar la mayor actividad de los radionucleidos analizados, es el que menor contribución aporta al cálculo de la dosis de radiación. La contribución de estos radionucleidos es la siguiente:  $^{228}\text{Th} > ^{234}\text{U} > ^{235}\text{U} > ^{238}\text{U} > ^{226}\text{Ra} \approx ^{210}\text{Po} > ^{228}\text{Th} > ^{230}\text{Th} > ^{232}\text{Th} > ^{40}\text{K}$ .

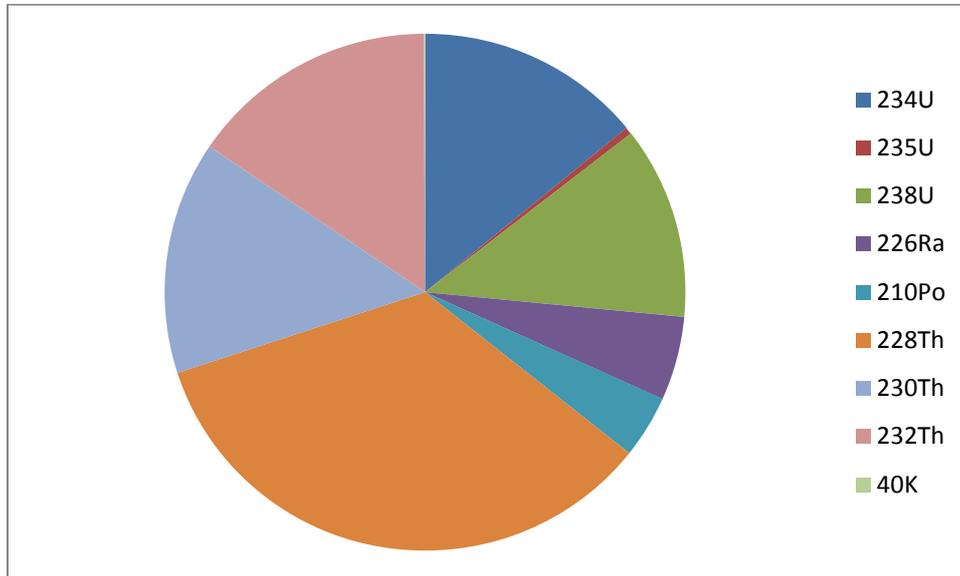


Figura 4.6: contribución de los diferentes radionucleidos a la dosis de radiación.

Por tanto, el Th es el radionúclido que más contribuye a la dosis de radiación, seguido del U

La dosis por radiación obtenida debido a la inhalación de polvo por parte de los trabajadores de la industria analizada (en la que se transforma casi exclusivamente el granito Gris Quintana), que es de 0,048 mSv/a, se encuentra muy por debajo del límite de dosis efectiva, establecida en 1 mSv/a para el público en general, entre los que en principio se encontrarían los trabajadores de la industria del granito (Directiva 2013/59/EURATOM. CE, 2014). Hay tener en cuenta que este dato de dosis efectiva calculado, se obtiene a partir de una hipótesis muy conservadora en la que se parte de un trabajador que todo el polvo que respira procede del granito y además que el trabajador no utiliza medios de protección individuales. Hay que recordar que la utilización de máscaras tipo FFP3, filtran hasta el 99% de las partículas sólidas mayores de 1 micra.

Zwack et al., 2014, obtiene un valor de dosis de radiación para trabajadores de la industria del granito de 0,062 mSv/a. Ese trabajo utiliza para el cálculo de esa dosis efectiva, la metodología desarrollada por la ICRP (ICRP 1979, 1994a, 1994b, 2012). La estimación realizada es una estimación conservadora, que se efectúa sobre un trabajador expuesto durante todo su año de trabajo en un ambiente de polvo de granito, con concentración en el aire de  $5 \text{ mg m}^{-3}$  de granito respirable. En dicho estudio se establece un rango de valores para las fábricas de granito que va desde <0,001 a 0,101 mSv/año.

### 4.2.3 Exposición al radón.

Los suelos graníticos, caracterizados por la presencia natural de uranio en diferentes concentraciones, pueden ser zonas potenciales de riesgo radiológico por presencia de radón (Peake, 1998). Existe, una relación directa entre la geología, la concentración de uranio y la presencia de radón. La actividad minero-industrial objeto de estudio en este trabajo (extracción y transformación de granito) se desarrolla sobre un batolito granítico, con lo que la posible inhalación de radón y de sus descendientes de vida corta, debe analizarse como una potencial vía de exposición radiológica natural, para los trabajadores de este sector o miembros del público.

Los titulares de las actividades laborales que puedan estar sujetas a incrementos significativos a la exposición al radón y a sus descendientes de vida corta de los trabajadores o del público (CE, Directiva 2013/59/EURATOM), deben proteger la salud de los trabajadores más expuestos a este gas, especialmente en aquellos lugares cerrados que puedan favorecer su transporte y acumulación. Mediante el Real Decreto 1439/2010 se obliga directamente a los titulares de las actividades en las que existan fuentes naturales de radiación, como el radón, a realizar los estudios necesarios para determinar si existe un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o de los miembros del público, que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica, sin necesidad de que estos estudios sean exigidos por las autoridades competentes

La determinación de las concentraciones de radón en diferentes lugares o puestos de trabajo de la empresa extractora y transformadora de granito elegida, se plantea como una tarea básica a la hora de recopilar la información que permita identificar y analizar uno de los factores que más incrementa el riesgo de sufrir cáncer de laringe, según la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2009).

La Unión Europea recomienda a sus estados miembros (CE, Directiva 2013/59/EURATOM) un nivel de protección de los trabajadores frente al radón en espacios interiores, de 300 Bq/m<sup>3</sup> de concentración media anual, tanto para iniciar acciones de remedio, como para aplicar las correspondientes medidas de protección radiológica, en el caso de que una vez realizadas las acciones de remedio no se consiguiera bajar de este nivel.

Para las actividades laborales que se vayan a desarrollar en nuevas edificaciones, se aplicará el valor que se incorpore en el Código Técnico de la Edificación, que no requerirá medidas de protección de los trabajadores.

Los puestos de trabajo al aire libre, quedan por definición excluidos inicialmente del riesgo de inhalación de radón, ya que no se espera encontrar en ellos valores elevados de concentración de este gas debido a su capacidad de diluirse en la atmósfera.

La presencia de radón en la zona de estudio fue determinada utilizando dos metodologías diferentes, una mediante detectores de carbón activo (cánister), que ofrecen un valor integrado para los días de exposición; otra determinación mediante la utilización de un equipo portátil "Alpha-GUARD" que permite medir concentraciones ambientales de radón de forma puntual.

Los detectores de carbón activo (cánister), son detectores pasivos que se caracterizan por ser sistemas muy simples de detección, basados en la capacidad del carbón activo para retener el radón. Tras la captación del gas en las cánister, se procede al sellado de las mismas en el propio emplazamiento, se espera hasta alcanzar el equilibrio 3 horas antes de la medida (EPA) y se procede

a la determinación del nivel de radón, midiendo la radiación emitida por el carbón activo en un detector adecuado de Germanio Hiperpuro Ge(HP). Las cánister de nuestro estudio fueron colocadas a una altura del suelo de 1.5 m, al ser ésta la altura media a la que un ser humano inspira el aire al interior de los pulmones, durante el proceso normal de respiración. Los tiempos de muestreos empleados para nuestro trabajo, variaron entre dos y tres días.

El calendario de muestreo se extiende a lo largo de todo un año, para de esta forma poder detectar y determinar la posible evolución de la presencia del radón en las distintas estaciones meteorológicas, a lo largo de dicho año.

Atendiendo a la singularidad de las instalaciones analizadas, se establecieron dos periodicidades diferentes para las determinaciones mediante el uso de las cánister:

1. Mensual: se estableció una periodicidad mensual en el caso de la oficina y los vestuarios, al ser dentro de las instalaciones de la empresa, las únicas zonas cerradas con presencia continua de trabajadores o público. Ambas instalaciones se encuentran sobre el propio batolito granítico y por tanto son susceptibles de acumular gas radón en su interior. Hay que tener en cuenta que el gas radón, en los lugares en los que aparece, tiende a concentrarse en las zonas bajas de las construcciones y en zonas con deficiente ventilación. Los vestuarios se sitúan en la planta baja de la construcción y la oficina se sitúa sobre ellos en la primera planta.
2. Anual: para la planta de transformación y para el taller de labra manual se estableció una temporalidad de carácter anual, ya que se tratan de naves industriales de grandes dimensiones y parcialmente abiertas al exterior. Por su condición de espacios abiertos o parcialmente abiertos y por tanto permeables a la continua circulación de aire en su interior, son áreas en las que no es susceptible de encontrar acumulaciones significativas de gas radón.

Teniendo en cuenta que las canteras en las que se extrae el material granítico corresponden a una minería a cielo abierto, la presencia y la exposición al gas radón de los trabajadores se puede considerar inicialmente como despreciable, con lo que la concentración de radón no fue determinada con este método (cánister), por la complejidad añadida que supone la colocación de los detectores a la intemperie y sin vigilancia.

Además, fue programada una campaña para las determinaciones puntuales de gas radón, mediante el equipo de medición portátil AlphaGUARD, que abarcó todas las instalaciones de la empresa estudiada: cantera, fábrica, labra manual, acopios,...

La estimación del nivel medio de exposición de un individuo al radón, a partir de cualquier metodología, presenta una variabilidad elevada debida no solo a la incertidumbre de medida, sino y fundamentalmente a la variabilidad temporal que presentan los niveles de radón, tanto en ciclos diarios como en ciclos estacionales o interanuales. Estas incertidumbres están asociadas a los diferentes gradientes de presión, condiciones meteorológicas, al subsuelo de los edificios, materiales de construcción y a los distintos hábitos de los ocupantes.

#### 4.2.3.1 Determinación de la presencia de radón en la oficina y en los vestuarios.

Estas dos zonas fueron las elegidas para realizar las determinaciones de radón a largo plazo mediante el uso de los detectores de carbón activo y sirven para hacer una estimación del nivel de exposición en condiciones normales de funcionamiento de la empresa.

Son las dos zonas con presencia de trabajadores o público dentro de todas las instalaciones minero-industriales de la empresa, susceptibles de albergar las mayores cantidades de radón, por ser zonas interiores cerradas situadas sobre el propio batolito granítico.

Los vestuarios utilizados por los trabajadores, están localizados en un lateral de la nave industrial de transformación, en una planta baja (a nivel de suelo). Aparecen aislados del resto de la planta de transformado y del exterior, mediante paredes prefabricadas de hormigón, puertas y ventanas. Tienen un suelo hormigonado que lo aíslan del contacto directo con el suelo granítico. La superficie aproximada que ocupan estos vestuarios es de 40 metros cuadrados. Los trabajadores se concentran en este lugar en el momento de los cambios de turno y durante los momentos de descanso dentro de la jornada laboral (figura 4.7).



Figura 4.7: detalle de los vestuarios en los que se realizaron las determinaciones de radón.

Las oficinas administrativas de la empresa, se encuentran situadas de igual forma en un lateral de la nave de transformación, exactamente en una primera planta, situada justo en la parte superior de los vestuarios y ocupando una superficie aproximada de 40 metros cuadrados. Aparece dividida en dos despachos de aproximadamente 25 y 15 metros cuadrados, con una solería y mobiliario fabricado básicamente en granito pulido, con espesores de tabla de 2 ó 3 centímetros (figura 4.8).



Figura 4.8: detalle de la oficina en la que se realizaron las determinaciones de radón.

Las determinaciones de radón mediante el uso de los detectores de carbón activo se llevaron a cabo mensualmente, de forma ininterrumpida, desde el día 16 de mayo de 2011, hasta el 18 de junio de 2012. En la figura 4.9 se representan los valores de las determinaciones de radón mediante cánister, en el periodo anteriormente referido.

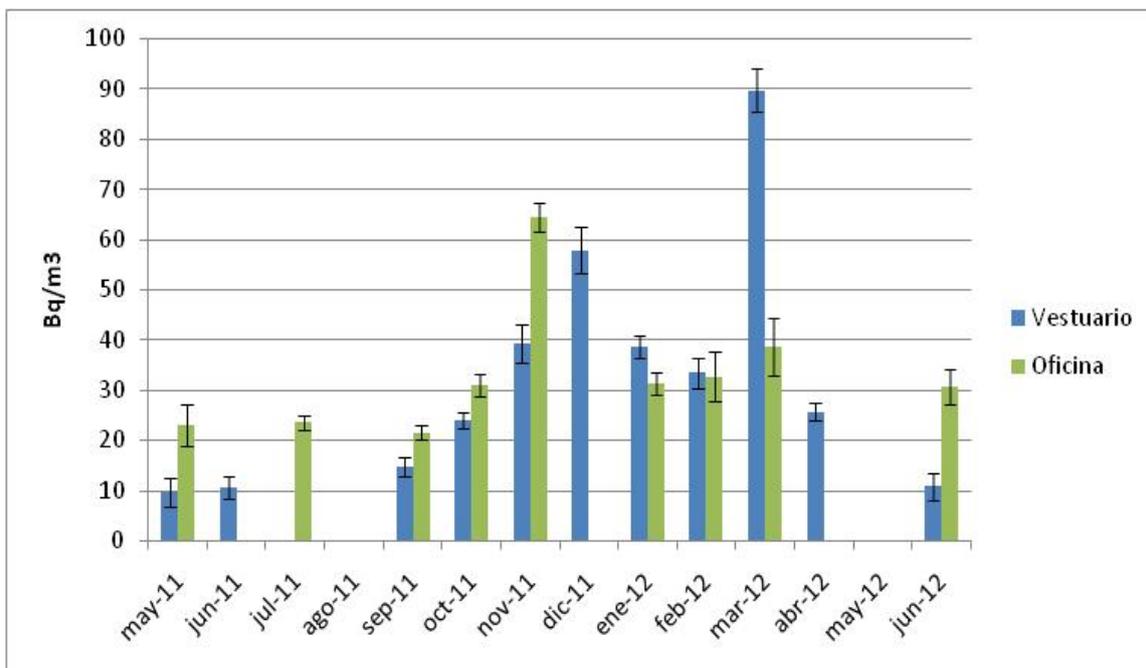


Figura 4.9: evolución de las concentraciones de radón a lo largo del año en vestuario y oficina.

La falta de valores de concentración de radón en algunos meses, se corresponde con el periodo vacacional de la empresa (mes de agosto) o a la obtención de valores inferiores al límite de detección ( $<10 \text{ Bq/m}^3$ ).

El rango de valores obtenido en las determinaciones realizadas en los vestuarios varía entre los  $10\text{-}90 \text{ Bq/m}^3$  y entre los  $23\text{-}64 \text{ Bq/m}^3$ , en el caso de la oficina. Por regla general, se observa que los valores de concentraciones de radón obtenido en los vestuarios son ligeramente superiores a los obtenidos en la oficina. Al encontrarse los vestuarios en la planta baja del edificio era previsible encontrar

mayores concentraciones de radón que en plantas superiores, ya que el gas radón producido por el  $^{226}\text{Ra}$  presente en el suelo, es el principal foco de radiactividad existente en el interior de las edificaciones, a las cuales entra principalmente a través de grietas de los cimientos, las paredes, huecos pared/cañería, así como por difusión a través de los cerramientos en contacto con el suelo (Garzón Ruipérez, L., 1992). La mayor presencia de radón en las oficinas puede deberse a que las construcciones no son sistemas estancos y en nuestro caso pueden influir otros factores como el aislamiento de las oficinas, el solado granítico de toda la superficie de la oficina y la presencia importante de mobiliario fabricado en granito. Los valores obtenidos tanto en la oficina como en los vestuarios, se encuentran significativamente por debajo de los  $300 \text{ Bq/m}^3$ , establecidos por la reglamentación vigente en los lugares de trabajo (RPSRI, Real Decreto 1439/2010).

Además, se observa un ligero incremento de las concentraciones en ambas habitaciones durante los meses de otoño e invierno, pudiéndose deber esta situación a que en invierno existe una menor ventilación que en verano, con el fin de evitar pérdidas en el sistema de calefacción. De acuerdo con la literatura (Arvela, 1995; Papaefthymou, 2003; Bochicchio et al., 2005) suele existir un factor de diferencia de 1,5 entre los valores de verano e invierno, aunque se han descrito todo tipo de desviaciones a este comportamiento.

Aunque el comportamiento de las dos habitaciones medidas es muy similar a lo largo del año, se detecta una concentración medida en los vestuarios del mes de marzo de 2012 que sobre sale por encima del resto de concentraciones y que no parece seguir ninguna secuencia lógica.

Finalmente y con el fin de comprobar de forma puntual la concentración de radón en la oficina, dentro del horario de la jornada laboral y por tanto con una actividad normal en la empresa, se realizaron una serie de determinaciones con el equipo Alpha-GUARD, con el siguiente resultado (tabla 4.9):

Localización	Fecha	Duración de cada medida	Número de determinaciones	Rango de concentraciones ( $\text{Bq/m}^3$ )
Oficina	18/06/2012	10 minutos	6	27-56
Oficina	23/05/2013	60 minutos	4	35-45
Vestuarios	18/06/2012	10 minutos	4	73-120

Tabla 4.9: determinaciones puntuales de concentraciones de radón, mediante equipo portátil, en la oficina y los vestuarios.

Como se puede comprobar en la tabla anterior, los rangos de valores medidos puntualmente con el equipo portátil en la oficina durante la jornada de trabajo, son de similar orden de magnitud a los obtenidos mediante las medidas integradas de las cánister. El comportamiento en el caso de los vestuarios es ligeramente diferente (teniendo en cuenta además las incertidumbres asociados a la media), acercándose más al valor en principio considerado como errático o elevado del mes de

marzo, pudiéndose deber este hecho a la proximidad física con la planta de transformación y estar desarrollándose trabajos en esos momentos en la misma.

Puede concluirse tras el análisis de todas estas determinaciones, que las concentraciones de radón en las zonas interiores cerradas de la instalación de la empresa, con presencia de trabajadores y público, se encuentran muy por debajo de los límites recomendados por la Unión Europea a sus estados miembros (Directiva 2013/59/EURATOM. CE, 2014) para recintos cerrados, dado que los niveles de referencia para el promedio anual de concentración de actividad en el aire, no superarán los  $300 \text{ Bq/m}^3$ .

#### **4.2.3.2 Determinación de la presencia de radón en la zona de acabados manuales de la nave y en la zona de labra manual.**

De igual forma y con el fin de completar el estudio sobre la presencia del gas radón en la fábrica de transformación de granito, fue diseñada una campaña de determinación de la concentración de gas radón en otras zonas diferentes a las oficinas y vestuario, utilizándose para ello igualmente las dos metodologías anteriormente descritas.

Las zonas seleccionadas para estas determinaciones, son zonas en las que existe la presencia continua de trabajadores y por tanto potencialmente expuestos a las posibles emanaciones gaseosas de radón, si existieran. Sin embargo, este posible riesgo se ve minimizado, al ser zonas en la fábrica completa o parcialmente abiertas y por tanto con una circulación continua de aire:

- Zona de acabados manuales: zona localizada en el interior de la nave de transformación. Situada en un lateral de la nave, próxima a su zona media, con un pavimento de hormigón. En esta zona se realizan trabajos manuales de pulido, corte, etc., y pueden encontrarse hasta 3 trabajadores de forma simultánea. Los trabajos suelen realizarse en esta zona utilizando la vía húmeda, lo que reduce de forma significativa el volumen de polvo emitido (figura 4.10).



Figura 4.10: detalle de la zona de acabados manuales de la planta de transformación.

- Zona del taller de labra: construcción anexa a la fábrica de transformación, en la que se realizan exclusivamente los trabajos manuales o artesanales de la empresa. La instalación no cuenta con una solería propiamente dicha, ya que el trabajo se desarrolla sobre el propio terreno natural. En este espacio suelen coincidir para el desarrollo del trabajo, 2 ó 3 empleados de forma simultánea. Aunque existen captadores de polvo diseñados para minimizar al máximo la presencia de polvo en el ambiente, el tipo de trabajo realizado en seco en esta instalación (abujardado, corte con radial, etc.) genera gran cantidad de polvo en suspensión (figura 4.11).



Figura 4.11: detalle de la zona de labra manual, anexa a la planta de transformación.

Para la campaña de captación de gas radón en estas zonas fueron establecidas dos fechas en los meses de verano de 2011 y de 2012, concretamente en julio de 2011 y en junio de 2012.

Los valores obtenidos en ambas campañas aparecen recogidos en la figura 4.12.

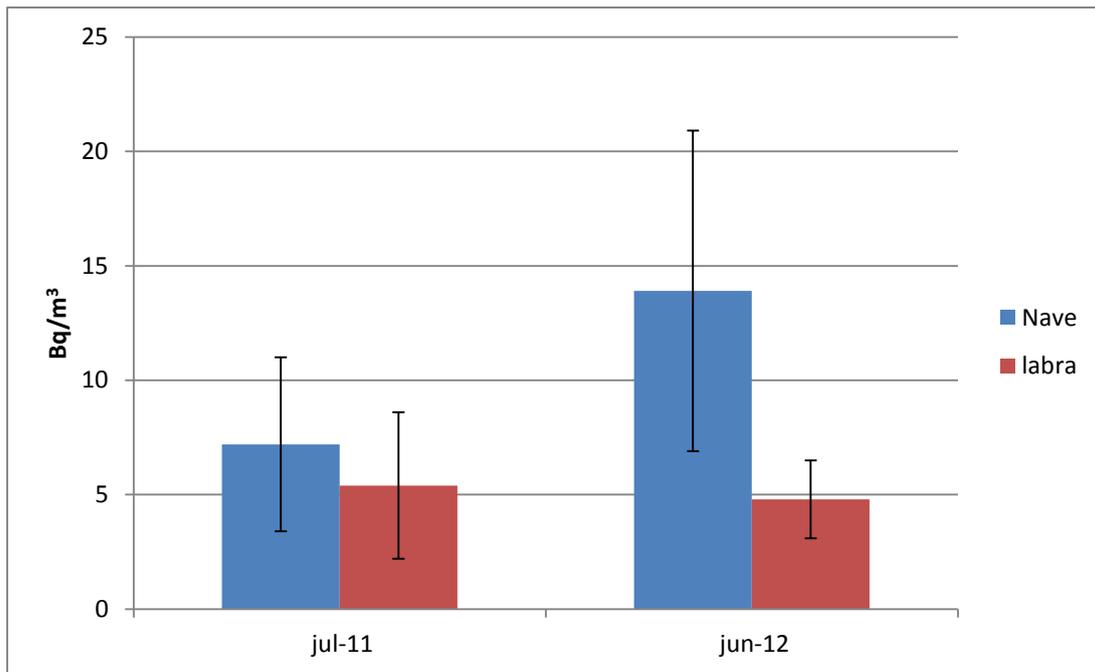


Figura 4.12: concentraciones de radón en la nave de transformación y en la zona de labra manual.

Como cabía de esperar, al ser áreas abiertas o semi-abiertas, las concentraciones de radón medidas son muy pequeñas, con valores que varían entre 5-14 Bq/m<sup>3</sup>. Dentro de estas mediciones los valores procedentes de la zona de acabado manual en la nave son ligeramente superiores a los de la zona de labra manual, ya que el taller de labra manual presenta únicamente como protección una cubierta y un lateral cerrado. La nave por su parte presenta cubierta y un cerramiento continuo perimetral, con grandes portones (no estancos) que se encuentran durante toda la jornada laboral abiertos.

Al tratarse de concentraciones pequeñas, no se aprecian diferencias significativas entre un año y otro (teniendo en cuenta las incertidumbres de las medidas).

Sin embargo, si se han apreciado diferencias significativas cuando se realizaron las determinaciones puntuales mediante el equipo portátil en una jornada, cuando hay trabajadores ejerciendo sus tareas diarias (tabla 4.10):

Localización	Fecha	Duración de cada medida	Número de determinaciones	Rango de concentraciones (Bq/m <sup>3</sup> )
Nave	18/06/2012	10 minutos	3	65-93
Labra manual	18/06/2012	10 minutos	4	118-216

Tabla 4.10: determinaciones puntuales de concentraciones de radón, mediante equipo portátil, en la nave y el taller de labra manual.

Con el análisis de esta tabla sí que se observa que las medidas puntuales presentan unos valores de concentración mayores que los observados en la medida integradora. Esto es debido a que las medidas fueron realizadas con trabajadores ejecutando su trabajo y por tanto con material granítico en suspensión. La zona con mayores concentraciones corresponde a la zona de la labra manual, donde a pesar de estar completamente abierta, al trabajarse en seco y a pesar de la existencia de captadores de polvo, el volumen de material en suspensión es mayor.

De cualquier forma y aunque las concentraciones de radón son mayores, están por debajo de las recomendaciones de la Comisión Europea para ambientes interiores (300 Bq/m<sup>3</sup>), situación que no aplicaría por ser localizaciones exteriores con facilidad de disipación del gas a la atmósfera.

#### 4.2.3.3 Determinación de la presencia de radón en cantera y zona de acopio de lodos.

La zona de cantera y de acopio de lodos, son zonas a cielo abierto, con lo que inicialmente no existe ningún riesgo de acumulaciones destacables de radón.

Con el fin de completar el mapa de concentraciones de radón en la empresa estudiada, también se programó una campaña de determinaciones de este gas, mediante medidas puntuales con el equipo portátil (AlphaGUARD). El muestreo fue realizado el 18 de junio de 2012 y los valores obtenidos en dicha campaña de muestro, aparecen relacionados de forma resumida en las tablas 4.11 y 4.12:

Las determinaciones de las concentraciones de radón fueron realizadas utilizando dos procedimientos diferentes con el AlphaGUARD: unas medidas exteriores directas de la concentración de radón en el aire y otras determinaciones realizadas en el interior de los acopios, utilizando para ello la lanza en una perforación realizada en los diferentes montones de jabre y de lodos.

Localización	Fecha	Duración de cada medida	Número de determinaciones	Rango de concentraciones (Bq/m <sup>3</sup> )
Frente de cantera	18/06/2012	10 minutos	7	9-16
Acopio de lodos	18/06/2012	10 minutos	2	93-133

Tabla 4.11: determinaciones puntuales de concentraciones de radón, mediante equipo portátil, en el frente de cantera y el acopio de lodos.

La concentración de radón en la cantera ofrecía valores muy bajos, equiparables a otras mediciones ya realizadas en la empresa a cielo abierto. En la zona de acopio de lodos los valores obtenidos fueron mayores, debido a que la medición se realizó sobre un volumen importante de lodos recién acopiados.

De entre todos los datos del estudio de las concentraciones de radón, los datos con diferencia más elevados obtenidos, fueron los procedentes de sendos agujeros practicados en el terreno: uno sobre un acopio en la cantera de jabre o lehm granítico (material superficial alterado de la formación granítica) y otro sobre un acopio de lodo (procedente de la planta de transformación de la empresa).

Localización	Fecha	Duración de cada medida	Número de determinaciones	Rango de concentraciones (kBq/m <sup>3</sup> )
Interior acopio de jabre	18/06/2012	1 minuto	10	61-91
Interior acopio de lodos	18/06/2012	1 minuto	10	9,5-10,7

Tabla 4.12: determinaciones puntuales de concentraciones de radón, mediante equipo portátil, en el acopio de jabre y en el acopio de lodos.

Para la realización de estas medidas, se practicó una pequeña perforación sobre el terreno de 5 centímetros de diámetro y 1 metro de profundidad, en cuyo interior se introdujo la lanza conectada al equipo Alpha-GUARD para obtener las concentraciones de radón.

Los resultados obtenidos en estas dos perforaciones fueron órdenes de magnitud totalmente diferentes a las obtenidas en todas las determinaciones anteriores. Esto es debido a que en ambos acopios existe una porosidad y permeabilidad en el material granular (jabre y lodo) granítico que no

presenta el propio granito. Existe mayor emanación en suelos porosos, donde el gas encuentra mayor facilidad para salir al exterior (Quindós L.S., 1995).

En el caso de las perforaciones practicadas en el suelo, el radón es capaz de viajar entre los poros del suelo hasta alcanzar la perforación, debido a la diferencia de presión entre los poros por donde viaja el gas y el espacio cerrado, estableciéndose un flujo desde el terreno hasta el interior de la perforación. Los mecanismos son por gradiente de presión (convección) y por gradiente de concentración (difusión).

La diferencia de concentración entre la perforación del jabre y la perforación de lodo radica en que el menor tamaño de las partículas de lodo y su elevado contenido en agua (humedad superior al 80%) hace que la porosidad y permeabilidad de los lodos disminuya con respecto al lehm granítico.

Según la NTP 440 (INSHT, 2003), las concentraciones de radón en suelos varían entre 10-50 kBq/m<sup>3</sup>, con lo que los valores obtenidos en nuestras determinaciones en el interior del acopio de lodos se encuentra en el límite inferior del rango y las determinaciones en el interior del acopio de jabre se encuentra por encima de este rango obtenido para suelos.

A pesar de estos altos contenidos en las concentraciones de radón en las perforaciones, el enorme volumen de aire de nuestra atmósfera es capaz de diluir el radón y con ello hacer que su concentración sea baja en este medio.

#### **4.2.4 Conclusión general sobre el estudio de la exposición de los trabajadores.**

Los trabajadores de la industria del granito al considerarse como miembro del público (trabajadores no expuestos a radiaciones ionizantes) pueden recibir hasta 1 mSv/a, sin tener en cuenta la dosis natural (nivel de fondo) y teniendo en cuenta todas las vías de exposición a excepción del radón (RPSRI e IS-33 del CSN, 2011).

De acuerdo a las determinaciones del presente estudio, se pueden establecer los siguientes valores de referencia:

- Fondo del batolito: 1,7-1,9 mSv/a. Esta es la dosis natural o nivel de fondo presente en la zona de estudio y a considerar.
- Irradiación externa: si se considera exclusivamente el rango obtenido en la zona de la fábrica, que es el lugar en el que se la presencia de los trabajadores es más significativa y continua, se obtiene un valor de irradiación de 1,2-2,2 mSv/a. A estos valores habría que restar el nivel de fondo determinado para el batolito, con lo que el valor máximo de irradiación medido estaría en torno a 0,3 mSv/a. En la zona de mayor irradiación medida (3,1 mSv/a), zona de acopio de bloques, este valor de irradiación podría situarse ligeramente por encima de 1 mSv/a, pero aquí la presencia de trabajadores o público es muy limitada y reducida.
- Inhalación aerosoles: la contribución a la dosis efectiva debida a la inhalación de polvo de granito es muy reducida ya que a pesar de utilizar para su cálculo una hipótesis muy conservadora, ésta no supera los 0,048 mSv/a.

Con respecto al radón, a pesar de no ser considerado para el cálculo de la dosis efectiva, el nivel mayor medido en la zona interior de los vestuarios (10-90 Bq/m<sup>3</sup>), se encuentra muy por debajo de los 300 Bq/m<sup>3</sup> identificado como nivel de intervención en lugares de trabajo con elevada

presencia de miembros del público (IS-33. CSN, 2011). Partiendo de modelos actuales de exposición (WHO, 2009), se deduce un factor de conversión de unos 30 Bq/m<sup>3</sup> por mSv/año entre la media temporal de la concentración de actividad de gas radón y el equivalente de dosis efectiva anual para la exposición del público en el interior de edificios, lo que supondría rangos de 0,5-3 mSv/a.

Por tanto, la dosis efectiva a la que se exponen los trabajadores de la empresa seleccionada para el estudio está muy por debajo de 1 mSv/a, identificado como valor de referencia. En cuanto a la exposición al radón, esos trabajadores también se encuentran muy por debajo de los 300 Bq/m<sup>3</sup>, definido como nivel de intervención.

### 4.3 MEDIOAMBIENTE

La generación de residuos es uno de los principales problemas en la mayoría de los sectores industriales, convirtiéndose en una de las claves que impiden el desarrollo del sector ornamental de la piedra. La gestión de estos residuos supone una tarea importante adicional para las empresas de la piedra. El proceso de extracción y transformación de la piedra natural, genera una cantidad significativa de material estéril de diferente granulometría que se pueden clasificar en tres categorías principales en función de su tamaño (Osnet, 2004):

- Fracción tamaño bloque: residuo que puede alcanzar un tamaño métrico.
- Fracción gruesa: residuos que puede tener un tamaño de varios centímetros.
- Fracción fina: que consta de partículas finas y tiene la forma de polvo o lodo. El lodo se crea a partir de todas las operaciones de corte de la roca, cuando el agua de enfriamiento se mezcla con las partículas finas de la roca.

La producción actual de granito estimada en la zona de Quintana de la Serena para el 2013, se encuentra en torno a 265.000 toneladas de producto final (principalmente de baldosas, bordillos y adoquines). Esta producción genera un importante volumen de residuo entre un 30-40 % en el caso de la industria del granito (Osnet, 2004): residuo grueso (119.250 toneladas) y de lodos (26.500 toneladas), cuyo destino final es el depósito en un vertedero centralizado, para su posterior tratamiento. Durante los procesos de extracción y de transformación, el volumen aproximado de agua utilizado por las empresas de la zona ronda los 10.000 L/día. Este agua es utilizado principalmente como refrigerante de la herramienta de corte y vía de evacuación de los lodos generados.

Los materiales más gruesos son generalmente triturados para su uso como áridos para la construcción (con el fin de reducir su impacto ambiental), o bien acumulados en escombreras para su posterior rehabilitación.

Los materiales más finos generados tanto en el proceso de corte como en los diferentes tratamientos mecánicos de acabado, se movilizan a través del agua, utilizada como elemento refrigerante de la maquinaria y movilizador de los residuos. El circuito de agua utilizado en el proceso, es un sistema semicerrado, con el fin de reducir el consumo externo de agua y maximizar el reciclaje de la misma, dando como resultado un aumento de los sólidos en suspensión en el agua utilizada durante el proceso. Los lodos son deshidratados para reducir el volumen de material a transportar para su

tratamiento o valorización. El uso de filtros-prensa permite una recuperación de agua de hasta un 80-90%, dejando aún un residuo final con un contenido de humedad en torno al 20 %.

Como ha quedado de manifiesto, la afección medioambiental de esta actividad minero-industrial es importante, con lo que su estudio desde un punto de vista radiológico adquiere una gran relevancia, de ahí la importancia de las determinaciones del contenido de radionucleidos de origen natural en los residuos generados y en el agua utilizada en el proceso.

Con el fin de comprobar esta posible afección radiológica, se procedió a un análisis de los mismos: fracción gruesa, lodos, agua de pozo y agua de procesado (agua antes y después de utilizarse en el proceso de transformaciones del granito). Con el fin de observar las posibles variaciones estacionales, se llevaron a cabo dos campañas de muestreo: la primera al final del invierno (marzo de 2011) y la segunda en otoño (noviembre de 2011, después de un verano especialmente seco en esta región).

#### **4.3.1 Materiales y metodología.**

Las determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura (LARUEX), siguiendo sus técnicas radioquímicas y analíticas. LARUEX es un laboratorio acreditado por ENAC según la UNE-EN ISO/IEC 17025, acreditación ENAC nº 628/LE/1260.

##### **4.3.1.1. Tratamiento previo de la muestra**

Para determinar las concentraciones totales de  $^{234}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$  y  $^{232}\text{Th}$  en las muestras sólidas del presente estudio, se ha seguido el siguiente procedimiento: secado en estufa de aire forzado a 100°C durante al menos 24 h para eliminar su contenido de agua libre; digestión ácida con una mezcla de  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  y (9:3:6 ml) en un horno de microondas (Milestone Ethos Pro Ltd.) a 200 °C, durante 20 minutos, antes del procedimiento radioquímica correspondiente; después de la digestión, las muestras se evaporaron a sequedad y se añade  $\text{H}_3\text{BO}_3$  para eliminar los fluoruros presentes.

Para determinar la concentración de  $^{210}\text{Po}$ , se digirió de forma proporcional 1 g en peso seco de muestra sólida con  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (8:2 ml) en un horno microondas a 180°C durante 20 min; posteriormente la muestra fue filtrada y convertida en un medio ácido (HCl).

Debido a la gran cantidad de partículas en suspensión en el agua recogida en la balsa de decantación, se produjo un filtrado de la misma a través de un filtro con 0,45  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro. Se han considerado dos fracciones a la hora de determinar los radionucleidos naturales presentes: la fracción retenida en el filtro y la fracción soluble.

##### **4.3.1.2. Determinación de los radionucleidos por espectrometría- $\gamma$ .**

Los radionucleidos naturales  $^{228}\text{Ra}$  y  $^{40}\text{K}$  se determinaron mediante espectrometría- $\gamma$ , según el procedimiento definido en el apartado 3.2.1 del Capítulo 3.

#### 4.3.1.3. Procedimientos radioquímicos (U, Ra, Po y Th).

El contenido de uranio se determinó según el procedimiento descrito en el apartado 3.2.1 del Capítulo 3.

Para determinar el contenido de radio se siguió el siguiente proceso: se añadió  $^{133}\text{Ba}$  como trazador; el precipitado de  $\text{MnO}_2$  absorbe el radio presente en el agua; el radio fue coprecipitado en forma de  $\text{Ba}(\text{Ra})\text{SO}_4$  (Baeza et al., 1998); una vez obtenido el precipitado, éste es disuelto en  $\text{HNO}_3$  5M; el uranio y el torio presente en las muestras se extrajeron con TBP (fosfato de tributilo); el coprecipitado recuperado se determinó mediante espectrometría  $\gamma$  del  $^{133}\text{Ba}$  (302,85 y 356,01 keV) de las fuentes correspondientes, usando un detector de germanio de tipo N con una eficiencia relativa del 25%, una resolución de 1,87 keV para el pico 1332 keV del  $^{60}\text{Co}$  y una relación pico-Compton de 57.5:1.

Continuando con las determinaciones, el contenido del  $^{210}\text{Po}$  se llevó a cabo de la siguiente forma: el  $^{209}\text{Po}$  se utilizó como trazador; el polonio presente en la muestra fue coprecipitado con  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ; el precipitado se disolvió en  $\text{HCl}$  8M y se diluyó hasta 1,5 M  $\text{HCl}$ ; el polonio fue autodepositado en discos de plata para posteriormente ser medido mediante espectrometría alfa (Bolívar et al, 2002).

Finalmente, para determinar el contenido de torio de las muestras, se siguió el siguiente procedimiento: el  $^{229}\text{Th}$  se utilizó como trazador; el torio también fue coprecipitado con  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . La fuente de torio fue preparada por coprecipitación con  $\text{NdF}_3$ ; el precipitado se disolvió en  $\text{HNO}_3$  8M y se pasó a través de una columna rellena con resina Dowex 1x8; el torio retenido en la columna se diluyó con  $\text{HCl}$  concentrado.

#### 4.3.1.4. Determinaciones mediante espectrometría- $\alpha$ .

Las espectrometrías- $\alpha$  de las muestras de uranio, radio, torio y polonio se llevaron a cabo usando doce detectores de silicio diferentes, con una eficiencia media de 23,2% y una resolución de 38,7 keV para una distancia fuente-detector de 6 mm.

Para comprobar la calidad de las mediciones fueron utilizados diferentes materiales de referencia: IAEA-381 para el uranio, el IAEA Soil 6 para el radio y la espectrometría- $\gamma$ , y el IAEA-327 para el torio y el polonio.

#### 4.3.1.5. Procedimiento secuencial de especiación.

El procedimiento secuencial de especiación utilizado en este trabajo se basa en técnicas de uso frecuente en el análisis de los suelos agrícolas (Pavlotskaya et al, 1974; Krouglov et al, 1998.).

Las fracciones consideradas en el estudio fueron las siguientes:

1. Fracción soluble en agua. Extraída mediante  $\text{H}_2\text{O}$  (F1).
2. Fracción intercambiable. Extraída con  $\text{NH}_4\text{OAc}$  1 M (F2).
3. Fracción extraíble mediante ácido diluido. Extraída con  $\text{HCl}$  1 M (F3).
4. Fracción extraída mediante ácido concentrado. Se extrajo con  $\text{HCl}$  6 M (F4).

## 5. Fracción residual (F5).

La relación sólido-líquido en todas las fracciones es de 1:10, excepto para la fracción F5, que fue 1:2. La fase líquida obtenida en cada paso, se separa de la fase sólida por filtración mediante vacío, utilizando para ello un filtro de membrana de 0,45 micras. Las separaciones radioquímicas de cada fracción se llevaron a cabo según lo descrito en apartados anteriores.

### 4.3.1.6. Determinación de los parámetros físico-químicos del agua utilizada.

Las principales características físico-químicas del agua utilizada en el proceso industrial fueron analizadas siguiendo los procedimientos oficiales analíticos establecidos para el agua en la legislación española (BOE, 1987). El objetivo de estas determinaciones fue poder utilizar estos datos en la interpretación de los niveles de radionucleidos en el agua.

Los principales métodos analíticos utilizados fueron: la titración volumétrica (para determinar la concentración de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ ), nefelometría ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), espectrofotometría UV ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$ ), y espectrometría por absorción atómica ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ).

### 4.3.2 Contenido radiológico de los residuos de granito (fracción gruesa y fracción fina).

El impacto radiológico en el medioambiente de los residuos procedentes de la transformación del granítico, fue analizada a través del estudio de las diferentes tipologías en las que este residuo aparece: fracción gruesa y fracción fina (lodo).

Como se ha comentado con anterioridad, la forma más rentable en la actualidad para valorizar los residuos de granitos, es a través del machaqueo de estos restos para la fabricación de áridos con distintas granulometrías. Los áridos así obtenidos pueden tener diferentes usos en construcción: hormigones, mezclas asfálticas, etc. Para nuestro estudio se recogieron 25 kg aproximadamente de árido de tamaño 0-2 mm, derivado del machaqueo de residuos de granito Gris Quintana, procedente de las labores de transformación y extracción.

Para las determinaciones radiológicas de la fracción fina (lodos de granito), fue necesaria la recogida de 50 kg de muestra. Esta toma de muestras fue realizada a la salida del filtro prensa, encargado de extraer el material en suspensión y reciclar el agua utilizada durante los diferentes procesos de transformación. Aunque durante el proceso del filtro prensa se consigue recuperar gran parte del agua del proceso, los lodos resultantes contienen en torno a un 20% de humedad.

El muestreo para este trabajo fue realizado el 17 de febrero de 2011.

De manera previa a las analíticas se realizó una preparación de muestras consistente en el secado, molturado y tamizado del lodo.

La tabla 4.13 muestra el contenido de algunos de los principales radionucleidos naturales analizados tanto en la fracción gruesa del residuo como la fracción fina generada durante el proceso de transformación por la empresa seleccionada para el estudio.

Radionucleido	Fracción gruesa	Fracción fina	Radionucleido	Fracción gruesa	Fracción fina
$^{210}\text{Po}$	$98 \pm 12$	$64 \pm 12$	$^{228}\text{Th}$	$79 \pm 7$	$70 \pm 6$
$^{234}\text{U}$	$89 \pm 9$	$73 \pm 11$	$^{230}\text{Th}$	$98 \pm 9$	$76 \pm 6$
$^{238}\text{U}$	$88 \pm 9$	$71 \pm 11$	$^{232}\text{Th}$	$70 \pm 7$	$70 \pm 6$
$^{226}\text{Ra}$	$99 \pm 9$	$100 \pm 10$	$^{40}\text{K}$	$1174 \pm 15$	$1246 \pm 18$
$^{228}\text{Ra}$	$76 \pm 2$	$62 \pm 4$			

Tabla 4.13: niveles de actividad del  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ ,  $^{226,228}\text{Ra}$ ,  $^{228,230,232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , expresado en Bq/kg, procedentes de los residuos generados en el proceso de transformación del granito (fracción gruesa y fracción fina).

Analizando la tabla anterior, se puede observar que los contenidos de  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  y  $^{230}\text{Th}$  en la fracción fina (lodos), son menores que los contenidos obtenidos en la fracción gruesa de la roca.

Los contenidos de  $^{234,238}\text{U}$  y  $^{228}\text{Th}$  en el lodo, parecen ser ligeramente inferiores a los contenidos en fracción gruesa del granito, aunque no es estadísticamente significativo teniendo en cuenta las incertidumbres de las medidas.

Los contenidos de  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$  en el lodo y en la fracción gruesa son casi iguales. En el caso del  $^{40}\text{K}$ , se observa un ligero aumento en el lodo analizado.

Estas variaciones en el nivel de actividad, sugiere que algunos de estos radionucleidos se pueden transferir al agua utilizada como refrigerante durante el proceso de transformación en la fábrica.

#### 4.3.3 Impacto radiológico en el agua utilizada en la industria del granito.

El agua dentro del proceso extractivo y transformador del granito adquiere una gran importancia por la doble función que tiene en él: por una parte elemento movilizador y evacuador de los residuos finos generados, y por otra parte elemento refrigerador de la herramienta diamantada utilizada en el proceso de corte o tratamiento.

En la cantera el sistema de refrigeración por agua es un sistema semicerrado, utilizando el agua procedente de charcas y de la esorrentía superficial, pero sin ningún tratamiento específico.

En fábrica el sistema de refrigeración por agua es cerrado, colectándose toda el agua de las diferentes máquinas de corte o tratamientos superficiales, para ser tratadas en filtros prensas y en balsas de decantación.

La finalidad de estos filtros es conseguir la máxima concentración de sólidos, deshidratando los mismos para recuperar el agua y almacenar o utilizar los sólidos deshidratados. Los filtros prensa están constituidos por un conjunto de placas provistas de una tela filtrante, con un accionamiento hidráulico de ciclos discontinuos, mediante llenados y descargas sucesivas. Se van formando capas de sólidos, al mismo tiempo se evacua el agua clarificada, una vez se alcanza la presión máxima requerida por el ciclo de filtración, que corresponde a la máxima concentración de sólidos en la torta, se separan progresivamente las placas, produciéndose la descarga de los sólidos retenidos en cada

una de las cámaras. Estos filtros no requieren adición de floculante y la humedad de las tortas que se obtienen es muy baja, del orden del 25 al 30%.

El agua clarificada pasa a sucesivas balsas para completar el proceso de decantación y ser de nuevo utilizada.

La distribución del tamaño de las partículas sólidas que aparecen en suspensión en las aguas del proceso es menor de 20  $\mu\text{m}$ .

La figura 4.13 representa de forma esquemática el proceso anteriormente descrito.

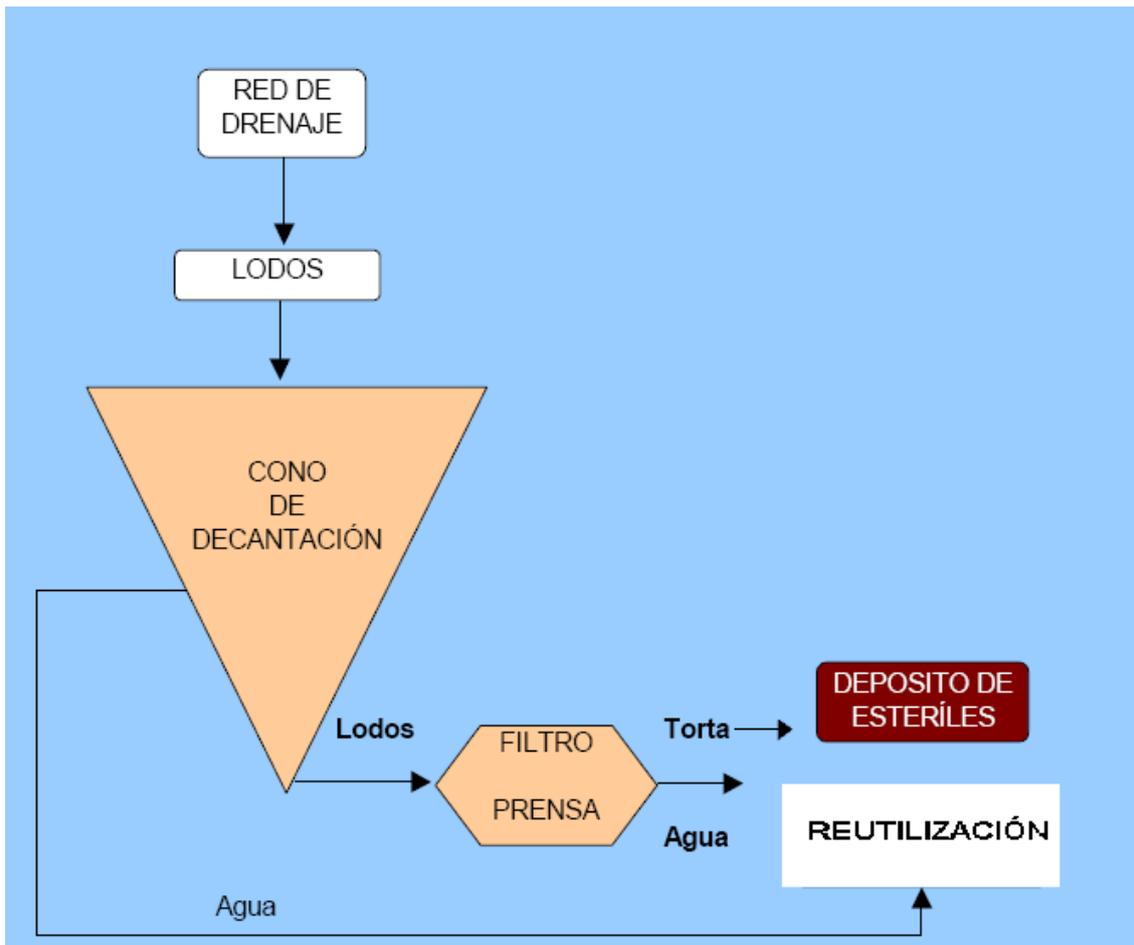


Figura 4.13: esquema de funcionamiento del proceso de reciclado de agua en la planta transformadora.

El análisis de la afección radiológica a las aguas utilizadas durante el proceso de corte y tratamiento superficial del granito, pasa en nuestro trabajo, por la realización de un muestreo de las aguas al principio y al final del proceso, esto es, muestras del agua procedente directamente del pozo de abastecimiento de la fábrica y muestras de agua procedente de la decantación de las balsas y filtro de lodos. El muestreo fue realizado en dos fechas diferentes.

- 1ª Toma de muestras de agua: 2 de marzo de 2011.
- 2ª Toma de muestras de agua: 17 de noviembre de 2011.

En ambos casos, se recogieron las siguientes muestras:

- 50 litros de agua procedente del pozo de abastecimiento de la planta, localizado en las inmediaciones de la fábrica de transformación. Es un pozo de sondeo realizado sobre el propio macizo granítico, de aproximadamente unos 75 metros de profundidad. El agua de este sondeo es utilizada en la fábrica para diferentes usos. Sirve además de apoyo y aporte a la procedente de la recirculación de la fábrica.
- 50 litros de agua procedente de la última de las balsas de decantación, situadas en el exterior de la planta de transformación. Estas aguas son el resultado final del proceso de depuración de todo sistema de tratamiento, que pasa por un filtro prensa y tres balsas sucesivas de decantación. Todas las aguas procedentes de los diferentes procesos en la fábrica (corte, pulido, abujardado, limpieza, etc.), pasan por este sistema.

En la tabla 4.14 aparece el contenido de los radionucleidos detectados en el agua subterránea procedente directamente del sondeo (agua limpia, sin utilización previa) y en el agua recogida en la balsa final de decantación de lodos, de la planta de transformación de la empresa estudiada.

Radionucleido	1ª Campaña			2ª Campaña		
	Agua del pozo (mBq/L)	Agua balsa lodos (mBq/L)		Agua del pozo (mBq/L)	Agua balsa lodos (mBq/L)	
		Materia suspendida	Solución		Materia suspendida	Solución
<sup>210</sup> Po	25 ± 4	93 ± 34	0,75 ± 0,25	21 ± 4	11 ± 7	3,2 ± 1,2
<sup>234</sup> U	69 ± 8	0,47 ± 0,18	379 ± 46	231 ± 35	4,7 ± 1,2	454 ± 8
<sup>238</sup> U	57 ± 7	0,36 ± 0,15	291 ± 36	175 ± 27	6,0 ± 1,5	421 ± 8
<sup>226</sup> Ra	19,9 ± 2,0	0,82 ± 0,18	40 ± 3	19,1 ± 1,7	5,9 ± 1,1	6,7 ± 0,8
<sup>228</sup> Ra	< 5,1	N.M.	55 ± 14	< 7,2	N.M.	< 4,4
<sup>228</sup> Th	0,75 ± 0,17	0,9 ± 0,4	1,4 ± 0,3	0,84 ± 0,23	4,1 ± 0,6	0,49 ± 0,30
<sup>230</sup> Th	0,31 ± 0,11	1,0 ± 0,4	0,18 ± 0,11	0,54 ± 0,18	4,6 ± 0,7	0,21 ± 0,19
<sup>232</sup> Th	0,11 ± 0,06	0,29 ± 0,21	< 0,14	0,18 ± 0,10	3,0 ± 0,5	< 0,31
<sup>40</sup> K	175 ± 49	N.M.	3067 ± 273	< 58	N.M.	1113 ± 646

Tabla 4.14: nivel de actividad del <sup>210</sup>Po, <sup>234,238</sup>U, <sup>226,228</sup>Ra, <sup>228,230,232</sup>Th, and <sup>40</sup>K, expresado en mBq/L, detectado en el agua del pozo y el agua procedente de la balsa de decantación para las dos fechas analizadas (clasificado en materia en suspensión y en solución). N.M. = no medida.

Tras un análisis inicial de las muestras analizadas se puede comprobar que existe un ligero incremento en la actividad de los radionucleidos en el agua procedente de la balsa de decantación, debido a que a pesar de realizarse dicho proceso de separación, sigue existiendo material sólido en suspensión (como lo demuestra el análisis químico del agua, tabla 4.15), que contribuye al aumento observado del contenido radiológico.

El contenido en <sup>210</sup>Po en el agua subterránea en ambas campañas, fue mayor que el encontrado en la fracción soluble de la balsa de decantación. En esta última, la fracción <sup>210</sup>Po unido a las partículas en suspensión era mayor que el existente en la fracción disuelta, a causa de su alta tendencia a asociarse con dichas partículas (Wildgust et al, 1998).

El contenido de <sup>234,238</sup>U en la fracción disuelta en el agua procedente de la balsa de decantación es mayor que el contenido del agua subterránea, con un factor comprendido entre 1,96 y 5,5. Esto

implicaba un enriquecimiento del contenido de uranio en el agua después de su uso como refrigerante y confirma lo observado entre la fracción gruesa analizada y la fracción fina (tabla 4.13). La fracción de uranio asociado con la materia en suspensión fue mucho menor que la fracción disuelta, dentro del rango de 0.1-1.4%. La relación  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  es ligeramente superior a 1,21 en el caso del agua del pozo y 1,30 en el caso del agua de la balsa, en la determinación de marzo de 2011. La razón por la cual esta relación es superior a 1 es debido a que el  $^{234}\text{U}$  es más fácilmente lixiviable en la roca, ya que se encuentra ocupando preferentemente lugares de la red cristalina ocupados previamente por átomos de  $^{238}\text{U}$  antes de emisión de partículas  $\alpha$ . Puesto que el  $^{234}\text{U}$  ocupa un sitio previamente "dañado", se moviliza con más facilidad, de ahí el enriquecimiento de las aguas en  $^{234}\text{U}$  por lixiviación (Ivanovich et al, 1982). El uranio es un elemento que tiende a ser relativamente móvil cerca de la superficie, solubilizándose en el agua como ion uranilo o como complejo aniónico

El contenido de  $^{226,228}\text{Ra}$  del agua procedente de la balsa de decantación, presenta un comportamiento diferente en las dos campañas analizadas. En la primera campaña, el contenido de ambos radionucleidos se incrementó en la fracción disuelta después de su uso, mientras que en la segunda campaña se observó una disminución. La relación entre la materia en suspensión y la fracción disuelta para el  $^{226}\text{Ra}$ , también cambió entre las dos campañas. El contenido  $^{226}\text{Ra}$  de las partículas en suspensión fue menor que en la fracción disuelta, en la primera campaña y aproximadamente la misma en la segunda. Por lo tanto, se necesitarán más investigaciones sobre este radionucleido para establecer definitivamente su comportamiento.

Los compuestos de torio tienen una baja solubilidad en el agua (Platford et al, 1986), por lo tanto, su contenido en las aguas subterráneas y el agua de la balsa de decantación, es el más bajo de todos los radionucleidos naturales considerados. El torio suele encontrarse en partículas en suspensión con tendencia a depositarse en el fondo; su concentración en aguas naturales suele ser tres veces inferior a la del uranio (Gascón et al, 1989). El contenido de  $^{228,230,232}\text{Th}$  en la fracción disuelta procedente del agua de la balsa de decantación era aproximadamente la misma que en el agua subterránea, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas. El mayor contenido de  $^{228}\text{Th}$  en la primera campaña, detectado en la fracción disuelta del agua procedente de la balsa de decantación, pudiendo ser debido al mayor contenido de  $^{228}\text{Ra}$  disuelto detectado en dicha fracción.

Por último, el contenido de  $^{40}\text{K}$  en el agua procedente de la balsa de decantación es varios órdenes de magnitud más alto que el observado en el agua subterránea, debido a la gran capacidad de disolución que presenta el potasio y al porcentaje de compuestos alcalinos del granito (ver Capítulos 2, Tabla 2.3).

Las muestras de las aguas procedentes tanto del pozo de suministro de la empresa analizada como de su balsa de decantación, fueron enviadas para su análisis químico al Laboratorio Agroalimentario de Extremadura, del Servicio de Calidad Agroalimentario de Extremadura de la Dirección General de Agricultura y Ganadería (Consejería de Agricultura, Desarrollo Rural, Medio Ambiente y Energía). Los resultados de las analíticas realizadas a las aguas recogidas, aparecen recopilados en la tabla 4.15.

Parámetros	1ª Campaña		2ª Campaña	
	Agua del pozo	Agua de balsa	Agua del pozo	Agua de balsa
pH	6,78	8,41	6,93	9,35
C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	527	1129	583	819
Residuo seco (mg/L)	409	697	470	547
$\text{HCO}_3^-$ (mg/L)	88	310	117	168
$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	88,28	55,27	79,46	25,94
$\text{NO}_2^-$ (mg/L)	< 0,02	3,17	< 0,02	0,20
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	47,0	55,4	73,5	44,9
$\text{Cl}^-$ (mg/L)	52	129	48	133
K (mg/L)	2,63	90,12	3,17	21,68
Na (mg/L)	39,22	139,10	46,39	58,39
Ca (mg/L)	46,20	22,79	53,00	3,64
Mg (mg/L)	16,00	22,47	20,40	35,56

Tabla 4.15: análisis químico de las aguas del pozo de abastecimiento y de las balsas de decantación de la empresa estudiada (marzo de 2011 y noviembre de 2011).

El uso de las aguas subterráneas como elemento de refrigeración, modifica significativamente sus características físico-químicas. En un análisis global de la química realizada se puede comprobar cómo a pesar del proceso de tratamiento del agua mediante filtro prensa y balsas de decantación, el agua recirculada en el proceso tiene un enriquecimiento de sólidos en suspensión, en las dos tomas de muestras realizadas. Esto se puede observar a simple vista por la ligera turbidez que presenta el agua en la última de las balsas de decantación, pero queda finalmente de manifiesto en las analíticas realizadas a ambas aguas, mediante el incremento tanto de los parámetros físicos (pH, conductividad, residuo seco,...) como de los químicos, por el aumento de la concentración de la mayoría de los elementos y compuesto químicos analizados, especialmente aquellos más solubles (cloruros, sodio y especialmente el potasio).

El contacto de las aguas subterráneas con el material fino en suspensión (procedente de los procesos de transformación en la fábrica) produjo un cambio en el pH de las mismas, pasando de un pH casi neutro a un pH básico (6,78 a 8,41 en la primera campaña y de 6,93 a 9,35 en la segunda campaña). Además, las partículas disueltas en el agua después del uso de la misma en la planta, producen un aumento en la conductividad y aumento en el residuo seco. En cuanto a las especies aniónicas en solución, se observó un aumento del  $\text{HCO}_3^-$  y del  $\text{Cl}^-$  en el agua de la balsa de decantación, siendo responsable del aumento del pH de la misma. Hubo también un ligero aumento en el contenido de  $\text{NO}_2^-$ , mientras que el contenido de  $\text{NO}_3^-$  en el agua de la balsa de lodos disminuía relativamente con respecto al del agua del pozo. El comportamiento del contenido del  $\text{SO}_4^{2-}$  fue diferente en las dos campañas, se produjo una disminución en la primera y un aumento en la segunda. Esta variación puede atribuirse a la desigual utilización de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) para nivelar y asegurar los bloques durante el proceso de corte en la fábrica y cuyo uso depende principalmente de la carga de trabajo de la empresa. Parte de este yeso se puede movilizar junto con los lodos en el proceso de corte. Los principales cationes en solución presentan un comportamiento diferente. El contenido del K, Na, y de Mg en el agua procedente de la balsa de decantación aumentó después de su uso en la fábrica, mientras que el contenido del Ca disminuyó. El aumento del contenido del K y del  $^{40}\text{K}$  en el agua de la balsa de lodos está correlacionado, porque  $^{40}\text{K}$  es el 0,012 % del K estable.

La modificación del contenido de aniones y cationes en el agua de la balsa de lodos, también modificó la forma química en la que los radionucleidos están presentes en disolución. Este conocimiento es importante si se requiere algún tratamiento para su eliminación (Baeza et al., 2006a). La especiación de compuestos inorgánicos de uranio y el radio disueltos en esas aguas se llevó a cabo mediante el uso de las constantes químicas incluidas en los índices geoquímicos (Wolery, 1992).

La figura 4.14 muestra la distribución de los principales compuestos inorgánicos de uranio (que es la forma más común y estable de U(VI) en medio acuoso) en las aguas subterráneas y en la balsa de decantación en la primera campaña.

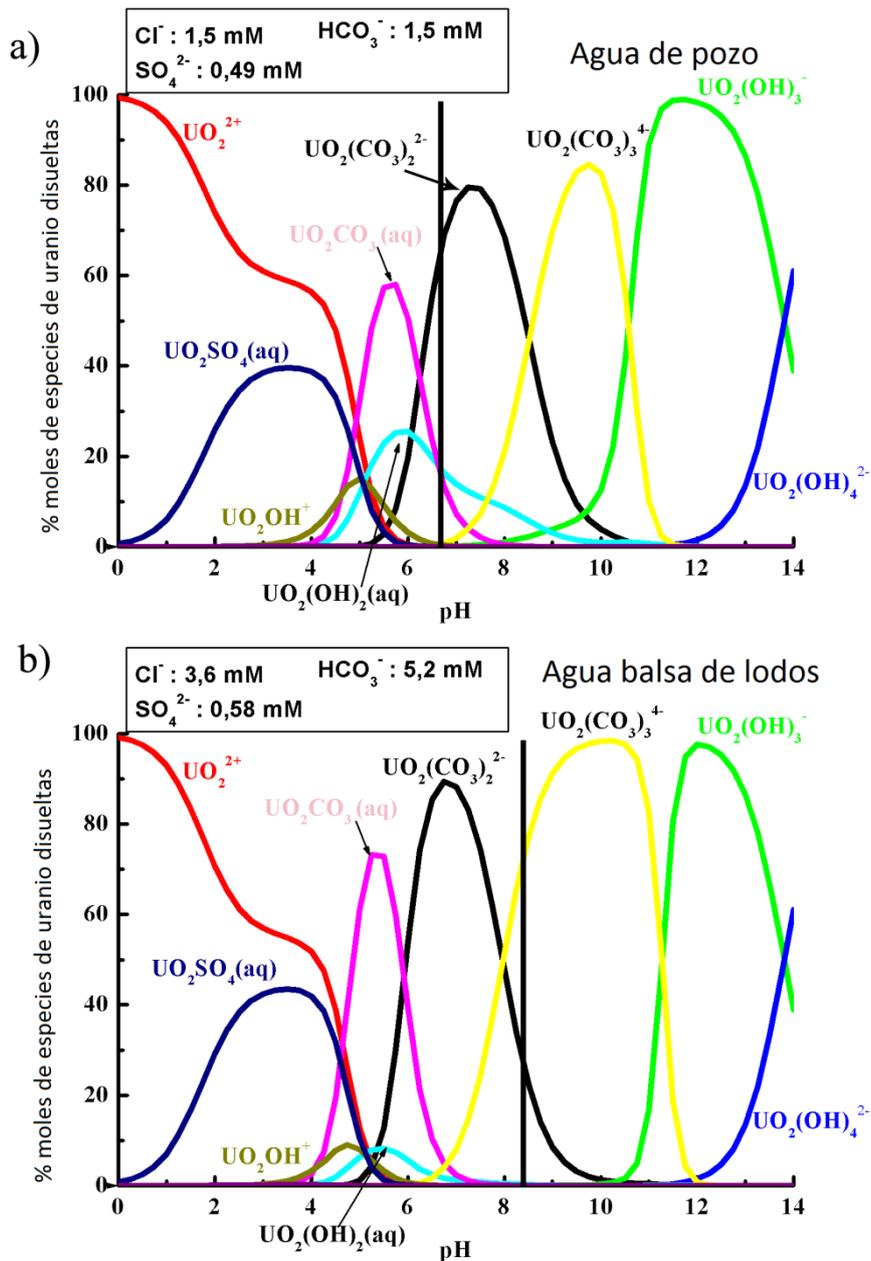


Figura 4.14: distribución de los principales compuestos inorgánicos de uranio en a) agua del pozo y b) agua de la balsa de lodos, recogidas en la primera campaña, versus pH. La línea vertical indica el pH del agua.

El mayor contenido de carbonatos en el agua de la balsa de lodos y el valor pH más alto, modificaron los principales compuestos de uranio presentes en la misma. En el agua subterránea, se encuentra principalmente como  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  (60%), seguido de especies neutras  $\text{UO}_2\text{CO}_3(\text{aq})$  y  $\text{UO}_2(\text{OH})_2(\text{aq})$  (alrededor de 20 % cada uno). Los compuestos de uranio disueltos en el agua de la balsa de lodos contienen aniones con carga negativa  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$  (70%) y  $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$  (30%).

El enriquecimiento de los contenidos de aniones en el agua de la balsa de lodos, no afectó significativamente la especiación de compuestos de radio disueltos (figura 4.15)

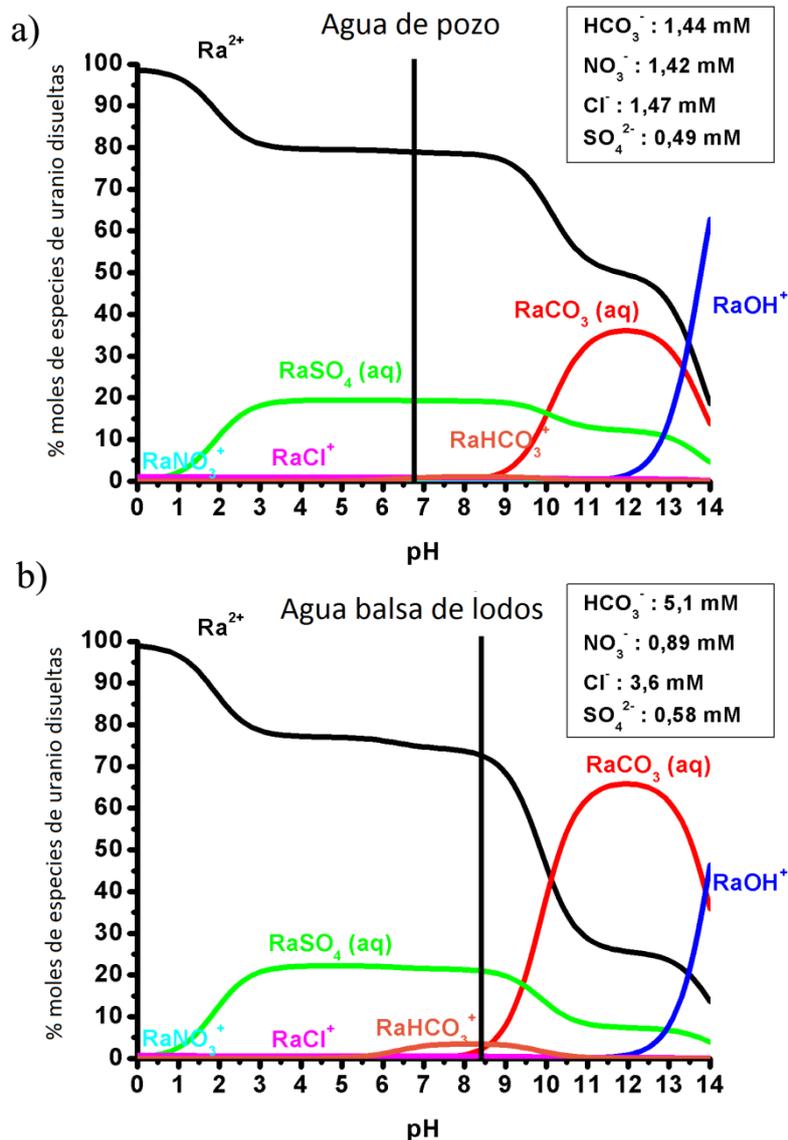


Figura 4.15: distribución de los principales compuestos inorgánicos de radio en a) agua del pozo y b) agua de la balsa de lodos, recogidas en la primera campaña, versus pH. La línea vertical indica el pH del agua.

Las principales especies, tanto en las aguas subterráneas como en el agua de la balsa de lodos, eran el  $\text{Ra}^{2+}$  seguido del  $\text{RaSO}_4(\text{aq})$ . En el agua de la balsa de decantación, debido de nuevo al mayor contenido de carbonatos y de pH, se observó una pequeña cantidad de  $\text{RaHCO}_3^+$  y  $\text{RaCO}_3(\text{aq})$ .

#### **4.3.4 Evaluación de la biodisponibilidad de los residuos de granito (fracción gruesa y fracción fina).**

Gran parte de los residuos generados durante el proceso de transformación del granito (fracción gruesa y fracción fina) son considerados finalmente como desechos y depositados en escombreras para su gestión medioambiental. En estas escombreras, los residuos pueden estar sujetos a la intemperie, con lo que el contenido de radionucleidos de origen natural puede ser liberado parcialmente al medio ambiente.

Por lo tanto, su impacto radiológico depende del grado de asociación de estos radionúclidos de origen natural, que se llevó a cabo por medio de un procedimiento de extracción secuencial (Pavlotskaya et al, 1974; Krouglov et al, 1998).

Las fracciones consideradas en nuestro estudio fueron: F1: soluble en agua, extraída con H<sub>2</sub>O doble destilada; F2: intercambiable, extraída con NH<sub>4</sub>OAc 1M; F3: extraíble con ácido diluido, extraída con HCl 1M; F4: extraíble con ácido concentrado, extraída con HCl 6M; y F5: residual.

Las figuras 4.16 y 4.17, muestran los resultados de este procedimiento aplicado a la fracción gruesa y a la fracción fina (lodo), respectivamente.

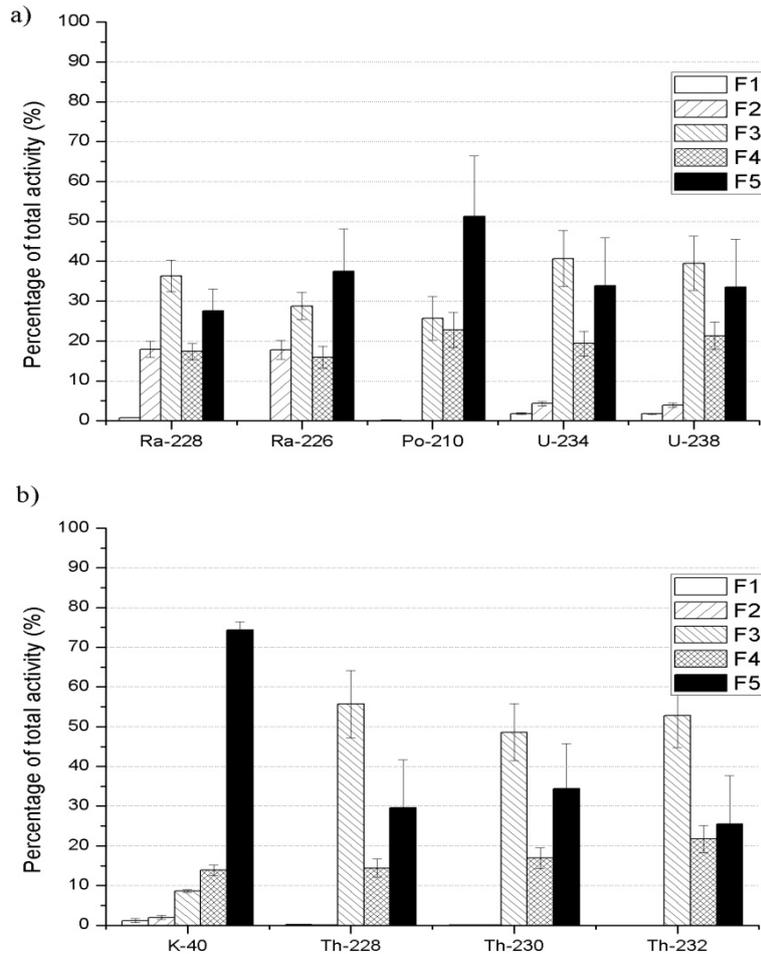


Figura 4.16: distribución del  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ ,  $^{226,228}\text{Ra}$ ,  $^{228,230,232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , expresado como %, presente en las diferentes fracciones obtenidas mediante la aplicación del procedimiento de extracción secuencial, para la fracción gruesa del residuo de granito. Fracción soluble (F1), fracción intercambiable (F2), fracción extraíble con ácido diluido (F3), fracción extraíble mediante ácido concentrado (F4) y fracción residual (F5).

En la fracción gruesa del residuo de granito, la fracción soluble en agua es casi insignificante para la mayoría de los radionucleidos de origen natural y muy baja para el uranio y el  $^{40}\text{K}$ .

El  $^{226,228}\text{Ra}$  se detectó principalmente en las fracciones de ácido diluido y en la fracción residual. La fracción intercambiable y la fracción ácido-concentrado presentan aproximadamente al mismo nivel.

El  $^{210}\text{Po}$  se localiza preferentemente a la fracción residual, seguido de la fracción de ácido-diluido y la fracción ácido-concentrado. Su presencia en la fracción intercambiable es prácticamente insignificante.

La distribución de los isótopos de  $^{234,238}\text{U}$  fue similar, ya que son un mismo elemento químico. El uranio se encuentra preferentemente en la fracción ácido-diluida y residual, seguido por la fracción ácido-concentrado. La fracción intercambiable fue baja, pero no insignificante.

El  $^{40}\text{K}$  se asocia principalmente a la fracción residual, que se puede atribuir al hecho de que el potasio es un componente esencial en algunos minerales comunes en el granito, como el feldespato potásico

(Capítulo 2, apartado 2.3.1); seguido por el ácido-concentrado, ácido-diluido, intercambiable y la fracción soluble en agua.

Los radionucleidos  $^{228,230,232}\text{Th}$  también mostraron un patrón de distribución similar, ya que son el mismo elemento químico. Todos ellos se asocian principalmente con la fracción ácido-diluido, seguido por la residual y la fracción ácido-concentrado. La fracción hidrosoluble e intercambiable, para los radioisótopos de torio, fue insignificante.

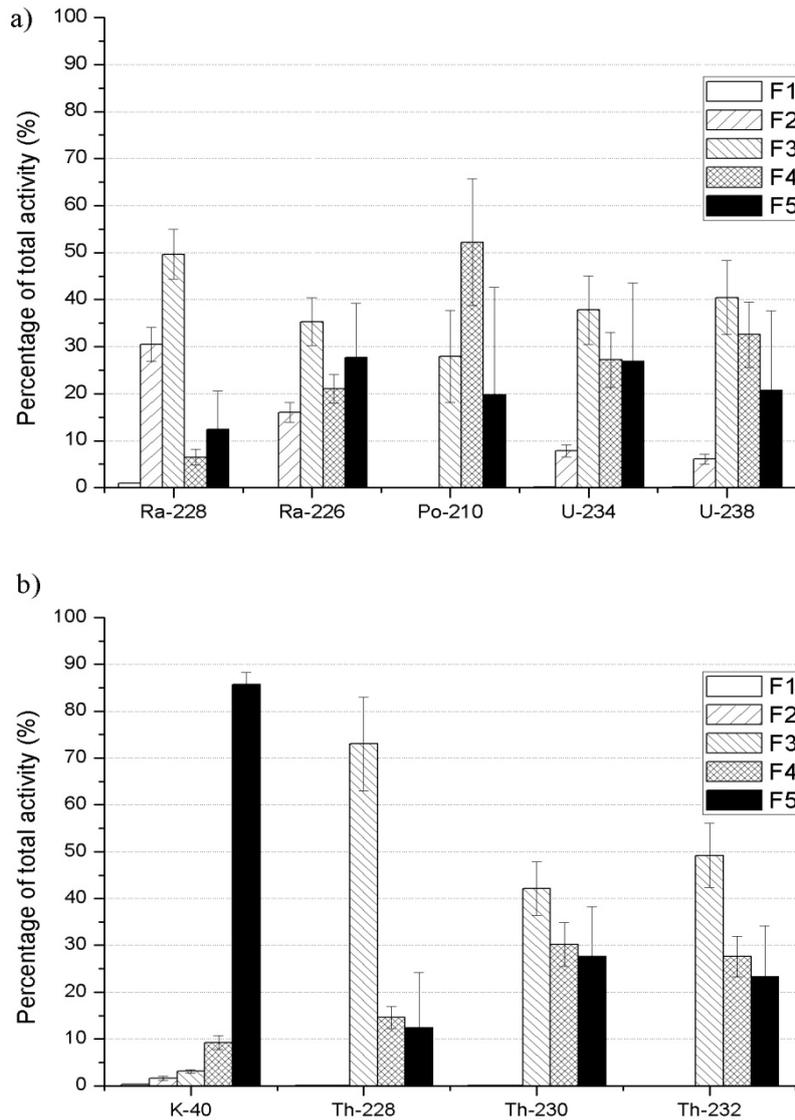


Figura 4.17: distribución del  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ ,  $^{226,228}\text{Ra}$ ,  $^{228,230,232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , expresado como %, presente en las diferentes fracciones obtenidas mediante la aplicación del procedimiento de extracción secuencial, para el lodo de granito. Fracción soluble (F1), fracción intercambiable (F2), fracción extraíble con ácido diluido (F3), fracción extraíble mediante ácido concentrado (F4) y fracción residual (F5).

En el caso de las muestras de lodo, los resultados obtenidos para los diferentes radionucleidos naturales, tras la aplicación del procedimiento de extracción, difieren de los obtenidos para los residuos gruesos de granito. Con la excepción del  $^{40}\text{K}$ , el porcentaje de los radionucleidos analizados asociados con la fracción residual en el lodo era menor que la detectada en el residuo grueso. El procedimiento de extracción secuencial puede ser beneficiado por el menor tamaño de las partículas del lodo ( $\sim 20\mu\text{m}$ ), en relación a la fracción gruesa. La fracción soluble en agua para todos los radionucleidos analizados, fue despreciable, debido al lavado continuo sufrido por el lodo por el agua utilizada como refrigerante.

Los patrones de distribución del  $^{226}\text{Ra}$  y del  $^{228}\text{Ra}$  en el lodo eran diferentes. El  $^{226}\text{Ra}$  se asocia principalmente con la fracción ácido-diluido, seguido por la fracción residual, la fracción ácido-concentrado y la fracción intercambiable. Sin embargo, el  $^{228}\text{Ra}$  se detectó preferentemente en la fracción ácido-diluido, seguido por de la fracción intercambiable, la fracción residual y la fracción ácido-concentrado. La fracción intercambiable para el  $^{228}\text{Ra}$  en el lodo fue mayor que la presente en el residuo grueso, mientras que para el  $^{226}\text{Ra}$  fue aproximadamente del mismo valor. Estas diferencias podrían deberse al hecho de que el  $^{226}\text{Ra}$  pertenece a la serie del uranio y el  $^{228}\text{Ra}$  a la serie del torio, con lo que se pudieran asociar a diferentes compuestos (aunque se necesita más investigación para verificar este aspecto).

El  $^{210}\text{Po}$  aparece asociado principalmente a la fracción ácido-concentrada, seguida de la fracción ácido-diluida y de la residual. Las fracciones hidrosoluble e intercambiable para el  $^{210}\text{Po}$  en el lodo, eran insignificantes.

La distribución del  $^{234}\text{U}$  y del  $^{238}\text{U}$  era la misma, teniendo en cuenta sus incertidumbres asociadas. Su presencia en la fracción ácido diluido fue la más alta, seguido de las fracciones de ácido-concentrado y residual. La fracción intercambiable fue la de más baja concentración, aunque mayor que la de residuos de roca gruesa. La presencia en la fracción soluble en agua fue insignificante.

El patrón de distribución del  $^{40}\text{K}$  fue el mismo en el lodo que en el de los residuos gruesos. Está asociado casi exclusivamente con la fracción residual.

El  $^{228,230,232}\text{Th}$  se asocia preferentemente con la fracción ácido-diluido, seguido de las fracciones ácido-concentrado y residual.

Debido al importante volumen de residuos generados en el proceso de transformación (119.250 toneladas de residuo grueso y 26.500 toneladas de lodos) y a la imposibilidad de valorizar la totalidad de los mismos para otros usos, una gran parte de estos residuos son depositados en escombreras y por tanto expuestos a la intemperie con la posibilidad de ser removilizados o erosionados por los diferentes agentes (agua y viento, principalmente). Como consecuencia de esta exposición a la intemperie, se puede producir una liberación parcial de los radionucleidos, que pueden ser absorbidos por la vegetación o la fauna presente en los alrededores de las escombreras.

Para que los radionúclidos puedan ejercer su toxicidad sobre un ser vivo, éstos deben encontrarse disponibles para ser captados por éste, es decir, deben ser biodisponibles. Las fracciones biodisponibles son aquellas que pueden ser fácilmente movilizadas o asimiladas por las plantas. Teniendo en cuenta esto, la fracción soluble en agua (F1) y la fracción intercambiable (F2) son generalmente consideradas como fácilmente asimilables por las plantas (Kennedy et al, 1997) y por tanto fácilmente biodisponibles.

La presencia de ácidos diluidos puede eliminar cationes en los complejos de cambio del suelo, además de poder disolver óxidos, hidróxidos, carbonatos y algunos compuestos de tierras alcalinas en el suelo (Bohn et al, 1993). Así, la fracción ácido-diluido (F3) puede ser considerada como potencialmente biodisponible por las plantas. De esta forma, la fracción potencialmente biodisponible puede ser definida como la suma de las fracciones F1 + F2 + F3. Para evaluar la biodisponibilidad, se asumió como hipótesis de trabajo, que la fracción de radionucleidos fuertemente unidas a las partículas del suelo, probablemente no puedan ser absorbidas por las plantas (Baeza et al, 2006b).

La tabla 4.16 muestra las fracciones fácilmente biodisponibles y potencialmente biodisponibles tanto, tanto de la fracción gruesa como de la fracción fina (lodos) de los residuos de granito analizados.

Radionucleido	Fácilmente biodisponible (F1+F2) (%)		Radionucleido	Potencialmente biodisponible (F1+F2+F3) (%)	
	Fracción gruesa	Fracción fina		Fracción gruesa	Fracción fina
$^{210}\text{Po}$	$0.22 \pm 0.05$	$0.041 \pm 0.020$	$^{210}\text{Po}$	$26 \pm 5$	$28 \pm 10$
$^{234}\text{U}$	$6.1 \pm 0.6$	$8.1 \pm 1.3$	$^{234}\text{U}$	$47 \pm 7$	$46 \pm 7$
$^{238}\text{U}$	$5.7 \pm 0.5$	$6.3 \pm 1.0$	$^{238}\text{U}$	$45 \pm 7$	$47 \pm 8$
$^{226}\text{Ra}$	$17.8 \pm 2.3$	$16.0 \pm 2.1$	$^{226}\text{Ra}$	$47 \pm 4$	$51 \pm 5$
$^{228}\text{Ra}$	$18.7 \pm 2.1$	$31 \pm 4$	$^{228}\text{Ra}$	$55 \pm 4$	$81 \pm 6$
$^{228}\text{Th}$	$0.32 \pm 0.04$	$0.107 \pm 0.021$	$^{228}\text{Th}$	$56 \pm 9$	$73 \pm 10$
$^{230}\text{Th}$	$0.11 \pm 0.02$	$0.080 \pm 0.017$	$^{230}\text{Th}$	$49 \pm 7$	$42 \pm 6$
$^{232}\text{Th}$	$0.011 \pm 0.008$	$0.014 \pm 0.007$	$^{232}\text{Th}$	$53 \pm 8$	$49 \pm 7$
$^{40}\text{K}$	$3.2 \pm 0.7$	$2.0 \pm 0.5$	$^{40}\text{K}$	$11.8 \pm 0.8$	$5.0 \pm 0.7$

Tabla 4.16: fracción fácilmente biodisponible (F1+F2) y potencialmente biodisponible (F1+F2+F3), expresada en %, de  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{234,238}\text{U}$ ,  $^{226,228}\text{Ra}$ ,  $^{228,230,232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , para la fracción gruesa y la fracción fina (lodo) del residuo de granito.

De acuerdo con estas definiciones, la biodisponibilidad de los radionucleidos naturales analizados en los residuos de roca estéril gruesa y en los lodos son aproximadamente los mismos. Esta biodisponibilidad puede ser ordenada de la siguiente manera:

- Fácilmente biodisponibles:  $^{226,228}\text{Ra} > ^{234,238}\text{U} > ^{40}\text{K} \gg ^{210}\text{Po} \approx ^{228,230,232}\text{Th}$ .
- Potencialmente biodisponibles:  $^{226,228}\text{Ra} \approx ^{234,238}\text{U} \approx ^{228,230,232}\text{Th} > ^{210}\text{Po} > ^{40}\text{K}$ .

El radio es el radionucleido más fácilmente biodisponible para las muestras residuos gruesos de granito y los lodos analizados. La diferencia entre estas definiciones es el contenido de la fracción ácido-diluido (F3). El uso de la fracción potencialmente biodisponible daría una evaluación más conservadora.



## **5. IMPACTO RADIOLÓGICO EN INDUSTRIAS CON MATERIALES RADIATIVOS DE ORIGEN NATURAL.**

Las industrias cuya actividad está relacionada con procesos de transformación de materias primas que pueden contener cantidades variables de radionucleidos naturales, han sido denominadas como Industrias NORM, como se ha podido comprobar en capítulos anteriores. Son industrias en las que se tratan o se separan materiales radiactivos naturales, incluidas aquellas en las que los procesos de transformación de las materias primas utilizadas pueden dar lugar a una concentración no intencionada de los radionucleidos naturales presentes, en los residuos o subproductos generados.

Un listado no exhaustivo de industrias en las que se utilizan materiales NORM, aparece en el Anexo VI de la Directiva 2013/59/EURATOM (CE, 2014) y definido en su Artículo 23. En esta Directiva se insta a los Estados Miembros a que se identifiquen los sectores industriales que suponen el tratamiento de materiales radiactivos naturales y que pueden dar lugar a una exposición a los trabajadores o a los miembros de la población, que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.

A pesar de que en dicho Anexo VI de la Directiva, no aparece inicialmente identificada la industria del granito, sí que aparece citado en la lista indicativa de tipos de materiales de construcción del ANEXO XII de esta Directiva, y por tanto se considera un material a tener en cuenta en relación con la radiación gamma emitida por los mismos, según lo referido en el artículo 75 de dicha Directiva.

Además, debido al sustrato geológico sobre el que se asienta la industria del granito, la posible presencia de gas radón y su potencial concentración en ambientes cerrados, hace que pudiera suponer un riesgo radiológico no despreciable para sus trabajadores o el público de su entorno.

El Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre, por el que se modifica el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes (RPSRI), aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio; establece que los titulares de actividades laborales en las que existan fuentes naturales de radiación, deberán realizar los estudios necesarios para determinar si existe un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o del público en general que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.

Este planteamiento hace que el estudio de impacto radiológico en la industria del granito, se convierta en una herramienta destinada a ofrecer la información necesaria a la Autoridad competente, sobre una actividad laboral en las que potencialmente existen fuentes naturales de radiación no reguladas. Se debe partir para ello de la caracterización radiológica del material utilizado (considerado como tal al granito como materia prima, así como subproductos y residuos generados), del estudio de los procesos industriales en los que se utiliza y de la identificación de los diferentes escenarios de exposición laboral y del público.

## **5.1. EVALUACIÓN DEL IMPACTO RADIOLÓGICO DE LA INDUSTRIA DEL GRANITO.**

### **5.1.1. Objetivo y campo de aplicación**

El objetivo de este capítulo es establecer los criterios radiológicos relacionados con la exposición a la radiación natural de los trabajadores de la industria del granito, con el fin de determinar si la actividad minero-industrial de la extracción y transformación del granito, puede quedar exenta del control radiológico o si por el contrario se deben establecer medidas de vigilancia, control, remediación o seguimiento por parte de las empresas del sector.

Este estudio debe enmarcarse en el impulso que ha recibido durante los últimos años, el desarrollo de normativa y reglamentación en términos de protección radiológica para actividades relacionadas con la componente natural de la radiactividad. El fin último de este capítulo es la elaboración de un protocolo de protección radiológica, basándose en el análisis de las principales vías de exposición de los trabajadores: irradiación externa, inhalación de aerosoles y exposición a radón (tabla 5.2) y en los residuos generados durante los procesos rutinarios. Para ello, se ha utilizado como industria modelo o tipo, una empresa considerada como representativa de la actividad minero-industrial, para este sector en Extremadura, como se ha podido comprobar en capítulos anteriores de esta Tesis.

El alcance del estudio a abordar será función de los niveles de exposición de los trabajadores o puestos de trabajo identificados, así como de la probabilidad de que coincidan varios factores.

La aplicación de la metodología descrita en este capítulo, permitirá establecer una serie de criterios para diseñar un "Protocolo para la evaluación del impacto radiológico de la industria del granito".

### 5.1.2. Niveles de referencia

Partiendo de los estudios de las diferentes vías de exposición a la que los trabajadores de las empresas de extracción y transformación del granito estarían potencialmente expuestos, será necesario abordar un estudio de aquellas actividades laborales o instalaciones en las que las concentraciones de actividad de los radionucleidos en la materia prima, residuos o subproductos, pudieran alcanzar los mayores valores.

De no superarse los valores de exención/desclasificación propuestos por el RPSRI y recogidos en la Instrucción IS-33 (CSN, 2011), para los trabajadores expuestos a radiación natural, se podrá dar el estudio por finalizado. A continuación se muestran los niveles establecidos:

- Valores de dosis efectiva a los trabajadores sobre el nivel de fondo: teniendo en cuenta todas las vías de exposición (irradiación externa y aerosoles), exceptuando la debida al radón:
  - $< 1$  mSv/a: no es necesario control
  - 1-6 mSv/a: se debe aplicar un nivel bajo de control
  - $> 6$  mSv/a: se debe aplicar un nivel alto de control
- Concentraciones de radón en lugares de trabajo: para concentraciones medias anuales de  $^{222}\text{Rn}$  durante la jornada laboral (solo radón):
  - $< 600$  Bq/m<sup>3</sup>: no es necesario control.
    - El nivel de intervención se establecerá en 300 Bq/m<sup>3</sup>, en lugares de trabajo con elevada permanencia de miembros del público
  - 600-1000 Bq/m<sup>3</sup>: se debe aplicar un nivel bajo de control.
  - $> 1000$  Bq/m<sup>3</sup> se debe aplicar un nivel alto de control.

Además, si los residuos NORM presentan un contenido de radionucleidos superior a los niveles de radiación establecidos en la Orden IET/1946/2013 (tabla 5.1), se deberá realizar el estudio de impacto radiológico asociado a esta gestión requerido por el RPSRI.

Radionucleido	Ae (Bq/kg)
U-238 (sec) incl. U-235 (sec)	500
U natural	5.000
Th-230	10.000
Ra-226+	500
Pb-210+	5.000
Po-210	5.000
U-235 (sec)	1.000
U-235 +	5.000
Pa-231	5.000
Ac-227+	1.000
Th-232 (sec)	500
Th-232	5.000
Ra-228+	1.000
Th-228+	500
K-40	5.000

Tabla 5.1. Niveles aplicables de actividad a los residuos NORM. (Orden IET/1946/2013).

### 5.1.3. Diseño del protocolo.

Para poder comprobar inicialmente si la actividad de la empresa a valorar debe estar sujeta a cualquier nivel de control desde un punto de vista radiológico, será necesario hacer un estudio global de la misma. Para ello, ha de tenerse presente la significativa dependencia temporal que poseen algunas variables radiológicas a cuantificar. Baste a modo de ejemplo citar la importante estacionalidad que poseen los niveles de concentración de radón (Arvela, 1995; Papaefthymou, 2003; Bochicchio et al, 2005). Debido a dicha circunstancia, o bien se elegirá para la realización de la toma de muestras y análisis in situ, la época del año en donde éstas deban registrar unas mayores concentraciones debido a la influencia de la meteorología o llevada a cabo en dos momentos con características meteorológicas radicalmente opuestas, es decir, verano e invierno, en donde se puede estimar la influencia que sobre los niveles a detectar tengan variables tales como la humedad relativa, la temperatura o la presión atmosférica.

A la hora de definir el protocolo a seguir para evaluar el impacto radiológico de la industria del granito, se han tenido en cuenta las recomendaciones de la Guía de Seguridad GS-11.03 (CSN, 2012), con el fin de establecer en su caso las medidas de remedio, vigilancia y control, a diseñar teniendo en cuenta el principio ALARA (norma básica de seguridad: tan bajo como sea razonablemente alcanzable).

Partiendo de este principio ALARA el estudio debe comprender:

- Descripción de la industria e identificación de la actividad industrial
- Identificación de las zonas o procesos que conlleven un riesgo radiológico
- Caracterización radiológica de las fuentes de exposición
- Estimación de dosis para trabajadores y público
- Programa de monitorización

Con el fin de simplificar el estudio, con el objetivo de poder llevar a cabo una rápida implantación y realización del mismo, se han identificado en la empresa estudiada (Capítulo 4), las principales fuentes de exposición, los procesos y las zonas que conllevan un mayor riesgo radiológico para el trabajador y el público en general, como se puede ver en la tabla 5.2.

Lugares de exposición	Fuentes	Vía de exposición principal
Oficina	Materiales de construcción	Radón
Cantera	Masa granítica Producto semielaborado (bloque) Residuos gruesos y finos (polvo)	Irradiación externa Inhalación de aerosoles
Planta de transformación	Producto semielaborado Residuos gruesos y finos (lodos)	Irradiación externa
Taller de labra manual	Producto semielaborado Residuos gruesos y finos (polvo)	Inhalación de aerosoles Irradiación externa
Zona de expedición y almacenamiento de producto	Producto acabado o producto semielaborado	Irradiación externa
Escombreras	Residuos gruesos y finos (lodos)	Irradiación externa

Tabla 5.2: Principales fuentes y vías de exposición para trabajadores y público en general, en una empresa de granito tipo.

Los lugares, las fuentes y las vías de exposición, identificados en la tabla anterior para la empresa de granito analizada en el presente estudio, pueden ser representativos del resto de empresas del sector del granito de la Península Ibérica, con un dimensionamiento parecido (PYME o MicroPYME). Ciertamente es que cada empresa del sector tiene su propia peculiaridad, ya que unas no contarán con canteras, algunas no tendrán planta de transformación, otras no tendrán labra manual,..., con lo que será necesario particularizar el estudio de acuerdo a la metodología definida, para cada una de ellas.

En la figura 5.1, se muestra de forma esquemática y reducida las principales interacciones entre los distintos procesos presentes en una industria tipo de granito.

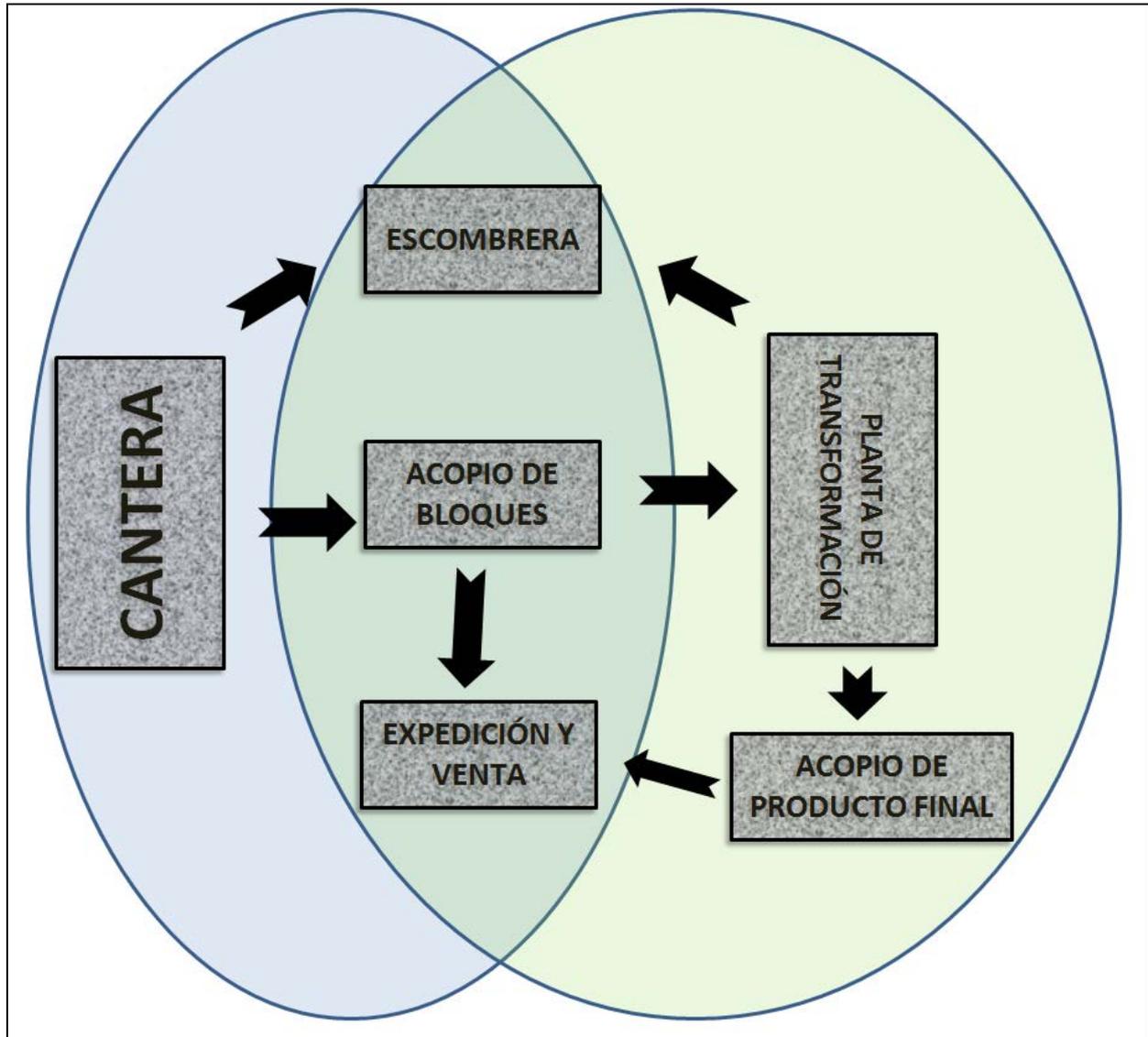


Figura 5.1: Esquema simplificado de funcionamiento de una empresa del granito.

### 5.1.3.1 Descripción de la industria e identificación de la actividad industrial.

Con el fin de poder identificar convenientemente los riesgos radiológicos asociados a la actividad minero industrial de una empresa, será necesario previamente conocer las tareas específicas que se realizan en dicha empresa.

La empresa debe estar convenientemente identificada, debiendo constar para ello los siguientes datos:

- Identificación del titular y denominación social de la empresa.
- Localización geográfica.
- Tipo de materia prima extraída y/o transformada: granito, mármol, pizarra u otras.
- Definición de la actividad de la empresa: extracción y/o transformación.

- e) Indicación de los procesos productivos de la empresa.
- f) Número de trabajadores y distribución dentro de la empresa.
- g) Volumen de producción de la cantera.
- h) Volumen de producción de producto elaborado o semielaborado.
- i) Volumen de residuos generados (gruesos y finos-lodos).

### 5.1.3.2 Identificación de las zonas o procesos que conlleven un riesgo radiológico.

De acuerdo a los análisis previos realizados en este trabajo sobre el sector, es necesario realizar un estudio radiológico adaptado a la tipología de empresa a estudiar y a sus singularidades tanto productivas como de instalaciones.

Según este planteamiento inicial, deberán ser identificadas y analizadas las principales vías de exposición radiológica en la empresa:

1. Concentración de radón. Como se ha podido demostrar en el capítulo anterior, los niveles de radón analizados tanto en el exterior, como en el interior de las instalaciones de la empresa del granito, no han sido significativos; siendo como cabía de esperar, los mayores valores los medidos en zonas interiores. Todos los niveles registrados se encuentran muy por debajo de los niveles de referencia vigentes. Con el objetivo de poder determinar en cualquier empresa extractora o transformadora de granito, la posible presencia de gas radón, será necesario analizar las zonas interiores de la empresa, especialmente aquellas en las que la presencia de trabajadores o público es mayor y más continua.
2. Irradiación externa. En zonas de geología granítica, el fondo radiológico presente suele ser muy elevado, con lo que además de realizar las determinaciones necesarias en la empresa a estudiar, será necesario establecer previamente un valor de fondo en el propio entorno del batolito granítico. Las zonas en las que se han detectado inicialmente los mayores valores de irradiación, han sido las zonas en las que se acopian volúmenes importantes de material elaborado o semielaborado (especialmente la zona del parque de bloques, lugar en el que se acopian los bloques de material que se han extraído de la cantera y están listos para su expedición o para ser transformados en la propia planta de transformación). Estas zonas son lugares en donde la presencia de trabajadores o público en general es limitada y en la mayoría de las ocasiones, estando localizados en el interior de maquinaria pesada acondicionada, que transita por la misma.
3. Inhalación de aerosoles. Los mayores niveles de polvo en suspensión en una empresa de piedra natural, se encuentra en aquellas zonas en las que se realizan trabajos sin la presencia de agua o sin captadores de polvo. Estas zonas son las zonas de trabajo manual (labra manual) en el caso de las plantas de transformación y en el frente de cantera en el momento de realizar las perforaciones (barrenado) para la extracción del granito.

### 5.1.3.3 Caracterización radiológica de las fuentes de exposición

La caracterización radiológica a considerar inicialmente en la empresa, debe incluir la de las materias primas utilizadas. En el caso de ser superados los valores de la tabla 5.1, se deberán analizar además los productos intermedios, los productos finales, los residuos sólidos y los efluentes. Se determinarán fundamentalmente, el  $^{40}\text{K}$  y los isótopos radiactivos de las cadenas del uranio y del torio.

### 5.1.3.4 Estimación de dosis para trabajadores y público

De acuerdo con el RPSRI, el titular de un establecimiento en el que se lleven a cabo actividades con presencia de radionucleidos naturales, debe realizar una evaluación de las dosis recibidas por los trabajadores y el público, salvo en el caso de que un estudio asociado a la actividad excluya todo riesgo de exposición significativa.

El estudio debe incluir la evaluación de las dosis efectivas de los puestos de trabajo anteriormente identificados, teniendo en cuenta los tiempos de permanencia. La evaluación de las dosis se puede hacer mediante estimaciones, completadas con medidas "in situ".

La evaluación de las dosis recibidas por los trabajadores puede basarse en una evaluación previa realizada por una instalación análoga. En ese caso, se debe justificar la similitud de los parámetros de exposición de los trabajadores con los de la instalación análoga o en un estudio genérico, en cuyo caso se deberá justificar que los resultados son aplicables a la instalación.

La Instrucción IS-33 (CSN, 2011), según lo estableció en el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (R. D. 1439/2010) fija unos valores de dosis efectiva a los trabajadores cuya superación requeriría la adopción de medidas correctoras o dispositivos de vigilancia (dosis de 1 mSv/a, sobre el nivel del fondo). De igual forma, establece unas concentraciones de radón en lugares de trabajo cuya superación también requeriría la adopción de medidas correctoras o dispositivos de vigilancia (concentración media anual durante la jornada laboral de  $^{222}\text{Rn}$  de 600 Bq/m<sup>3</sup>; 300 Bq/m<sup>3</sup> en lugares de trabajo con elevada permanencia de miembros del público).

Si durante la aplicación del protocolo definido en esta Tesis, no se detectan valores de concentración superiores a los mencionados en el apartado anterior, se considera que no es necesario a priori, llevar a cabo medidas ni estudios adicionales ya que en las actividades analizadas no sería previsible que la exposición de los trabajadores supere ninguno de los valores indicados.

Cualquier cambio significativo en las condiciones laborales de los trabajadores, cambios en el proceso productivo de la empresa o del suministro de materias primas, conllevaría la necesidad de repetir el estudio en los mismos términos mencionados en este protocolo.

Para este estudio y por tanto para el desarrollo del protocolo, se considera nivel de fondo, a aquellos valores de radiación natural determinados en zonas no afectadas directamente por la industria del granito (fuera de la zona de cantera o zona de transformación).

### 5.1.3.5 Programa de monitorización

Una vez realizada la caracterización radiológica inicial de la actividad de la empresa y su clasificación, atendiendo tanto a los criterios propuestos para los trabajadores expuestos a la radiación natural en

el RPSRI y recogidos en la Instrucción IS-33 (CSN, 2011), como a los niveles aplicables a los residuos NORM (Orden IET/1946/2013), la empresa estará en disposición de demostrar si es necesario realizar cualquier tipo de control radiológico en la misma o cualquier programa de monitorización en su actividad.

Si tras esta evaluación inicial la empresa es clasificada como NORM, el titular de la actividad deberá realizar una reevaluación de la exposición cada 5 años para asegurar que se mantiene por debajo de las condiciones indicadas en el apartado anterior. Asimismo deberá realizar esa reevaluación cuando introduzca cambios en la actividad que puedan alterar significativamente la exposición y siempre que obtenga evidencias de que ésta se ha modificado por cualquier otra circunstancia. La reevaluación de la exposición se realizará con la misma metodología que la evaluación inicial.

Si la actividad de la empresa no es clasificada como NORM, la empresa no necesitará realizar ningún control adicional, al menos que exista un cambio sustancial en su actividad (incorporación de nuevas materiales primas con evidencias de contener contenidos radiológicos significativos).

## **5.2 PROPUESTA DE PROTOCOLO PARA EL ESTUDIO RADIOLÓGICO DE UNA INDUSTRIA DEL GRANITO.**

Con el fin de poder evaluar inicialmente de forma sencilla la actividad de una empresa del granito desde un punto de vista radiológico, se propone una metodología de estudio, recogida en un protocolo de evaluación de sencilla implantación.

La implantación de este protocolo requiere una planificación previa de las actividades a realizar, de acuerdo a lo descrito en apartados anteriores de este capítulo y cumplimentar una serie de registros (Figura 5.2).

Estos registros recogen tanto la información básica de la empresa y su actividad, como la información sobre los materiales utilizados por la empresa y las diferentes fuentes y vías de exposición radiológica detectadas como principales.

A la hora de realizar este análisis de la empresa, se parte de las siguientes premisas iniciales:

1. A la hora de analizar el contenido radiológico de las materia primas, se seleccionarán aquellos materiales que tengan una importancia real en la actividad de la empresa, tanto por su porcentaje en el volumen de transformación, como por su almacenamiento en las instalaciones de la empresa.
2. La determinación del contenido radiológico de la materia prima, se realizará mediante espectrometría- $\gamma$ . Se determinarán el  $^{40}\text{K}$ , el  $^{232}\text{Th}$  y el  $^{226}\text{Ra}$ , considerando en equilibrio la serie del uranio.
3. A partir de esta determinación radiológica básica, la empresa estará en condiciones de ofrecer la siguiente información:
  - a. Determinación del índice I de las materias primas seleccionadas.
  - b. Clasificación de la actividad de la empresa (NORM-No NORM) de acuerdo a los niveles aplicables de actividad a los residuos NORM. (Orden IET/1946/2013).

- c. Cálculo de la dosis de radiación por inhalación de aerosoles. En el caso de que la empresa no cuente con valores de exposición de polvo, se utilizará el máximo permitido por la legislación vigente ( $3 \text{ mg/m}^3$ , ORDEN ITC/2585/2007).
4. Para realizar la clasificación de la actividad de la empresa y del cálculo de la dosis, se utilizará el material que tiene un índice I mayor.

En cuanto a la evaluación del contenido de radón en las instalaciones de una empresa del granito, se ha demostrado que las condiciones más favorables para la acumulación de este gas, son aquellos lugares interiores y con más escasa ventilación.

Las determinaciones de la concentración de radón en el aire, podrán ser realizadas mediante medidas de forma puntual o de forma integradora, indicándose en el estudio, el método utilizado. Estas medidas de radón deberán tener en cuenta su variabilidad estacional, con lo que será necesario programar una serie de medidas tanto en periodo estival (seco y caluroso) como en periodo invernal (húmedo y frío), o en su defecto, llevarlas a cabo cuando éste es de forma natural máximo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y al objeto de simplificar la toma de decisiones o el planteamiento inicial del estudio, a continuación se detalla en la siguiente tabla (tabla 5.3), las principales instalaciones que pueden encontrarse en una industria de granito y las determinaciones mínimas necesarias para la implantación del protocolo diseñado y por tanto para la realización del estudio del impacto radiológico de la industria.

Instalaciones		Vía exposición principal	Rn	E- $\gamma$	IR
Cantera	Oficina/vestuarios	Radón	X		
	Frentes de cantera	Irradiación externa			X
		Inhalación aerosoles		X	
Planta de transformación	Oficina/vestuarios	Radón	X		
	Nave de transformación	Irradiación externa			X
	Labra manual	Irradiación externa			X
		Aerosoles		X	

Tabla 5.3: resumen de las determinaciones a realizar teniendo en cuenta las instalaciones presentes.

Dependiendo de la actividad que realice la empresa y de las instalaciones que tenga la misma, el número mínimo de caracterizaciones puede variar por tanto de acuerdo a la tabla anterior.

Las determinaciones deberán realizarse siempre del lado de seguridad de los trabajadores, con lo que para la realización de las mismas se considerarán aquellos lugares en los que es posible encontrar mayores concentraciones o en donde la presencia de trabajadores o del público en general es más significativa. De esta forma, se considerará el peor caso de los posibles, esto es, el trabajador más expuesto.

La figura 5.2 representa la propuesta de registro a la hora de cumplir con el protocolo propuesto en este capítulo.

<b>EVALUACIÓN RADIOLÓGICA DE UNA INDUSTRIA DEL GRANITO (Pag. 1/...)</b>					
<b>INFORMACIÓN DE LA EMPRESA</b>					
Información administrativa general					
Razón social:				CIF:	
Domicilio:				C.P.	
Localidad:				Provincia:	
Tfno/Fax				e-mail:	
Información de los centros de trabajo					
Localización de la planta de transformación:					
Localización de la zona de cantera:					
Información sobre los trabajadores					
Número de trabajadores:	Oficina		Planta		
	Cantera		Labra manual		
Horario	Verano				
	Invierno				
Información sobre las instalaciones					
Captadores de polvo					
Filtro prensa					
Balsas de decantación					
Escombrera propia					
Identificación de las materias primas					
Naturaleza	Granito		Mármol		Pizarra
	Otras				
Procedencia	Cantera(s) propia(s)				
	Compra de materia prima				
Materiales transformados en la planta					
Material 1		% relativo		Procedencia	
Material 2		% relativo		Procedencia	
Material 3		% relativo		Procedencia	
Material 4		% relativo		Procedencia	
Material 5		% relativo		Procedencia	
Información adicional					

<b>EVALUACIÓN RADIOLÓGICA DE UNA INDUSTRIA DEL GRANITO (Pag. 2/...)</b>						
Materias primas						
Determinación del contenido radiológico de la materia prima (espectrometría-γ), Bq/kg.						
Roca 1	<sup>226</sup> Ra		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K	
Roca 2	<sup>226</sup> Ra		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K	
Roca 3	<sup>226</sup> Ra		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K	
Cálculo del índice I						
$I = \frac{C_{Ra}}{300 (Bq/kg)} + \frac{C_{Th}}{200 (Bq/kg)} + \frac{C_K}{3000 (Bq/kg)}$						
Índices	I-1		I-2		I-3	
Trabajadores						
Aerosoles. Cálculo de la dosis de radiación anual (variedad comercial con mayor índice I)						
Determinación del contenido radiológico de fracción respirable (espectrometría-γ), Bq/kg.						
<sup>226</sup> Ra		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K		
Concentración polvo empresa (mg/m <sup>3</sup> )						
<i>Dosis de radiación (mSv/a) = Σ A × d × V × e</i>						
A: Actividad del radionucleído (Bq/kg).				d: Exposición al polvo (mg/m <sup>3</sup> ).		
e: Factor conversión dosis, DCF. ICRP-119. (mSv/Bq).				V: Vol. anual de aire respirado (m <sup>3</sup> /a).		
Irradiación externa						
Método de medida						
Medidas (mSv/a)	Fondo (exterior zona minero industrial)					
	Máximo medido en instalación, con presencia de trabajadores					
Irradiación externa descontando el nivel de fondo (mSv/a)						
Radón						
Método de medida						
Identificación del lugar de medida (local +/- cerrado con presencia de trabajadores)						
Medida verano (Bq/m <sup>3</sup> )			Medida invierno (Bq/m <sup>3</sup> )			
<b>CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL (Orden IET/1946/2013)</b>						
NO NORM			NORM			
<b>NIVEL DE CONTROL DEL RADÓN (IS-33)</b>						
No es necesario control		Nivel bajo de control			Nivel alto de control	
< 600 Bq/m <sup>3</sup>		600-1000 Bq/m <sup>3</sup>			> 1000 Bq/m <sup>3</sup>	
<b>DOSIS EFECTIVA A LOS TRABAJADORES (IS-33)</b>						
(Irradiación externa+aerosoles)						
No es necesario control		Nivel bajo de control			Nivel alto de control	
< 1 mSv/a		1-6 mSv/a			> 6 mSv/a	

Figura 5.2: Registro para la realización de la evaluación radiológica de una empresa del granito

La aplicación de este protocolo se puede visualizar de forma sencilla en el siguiente esquema (Figura 5.3):

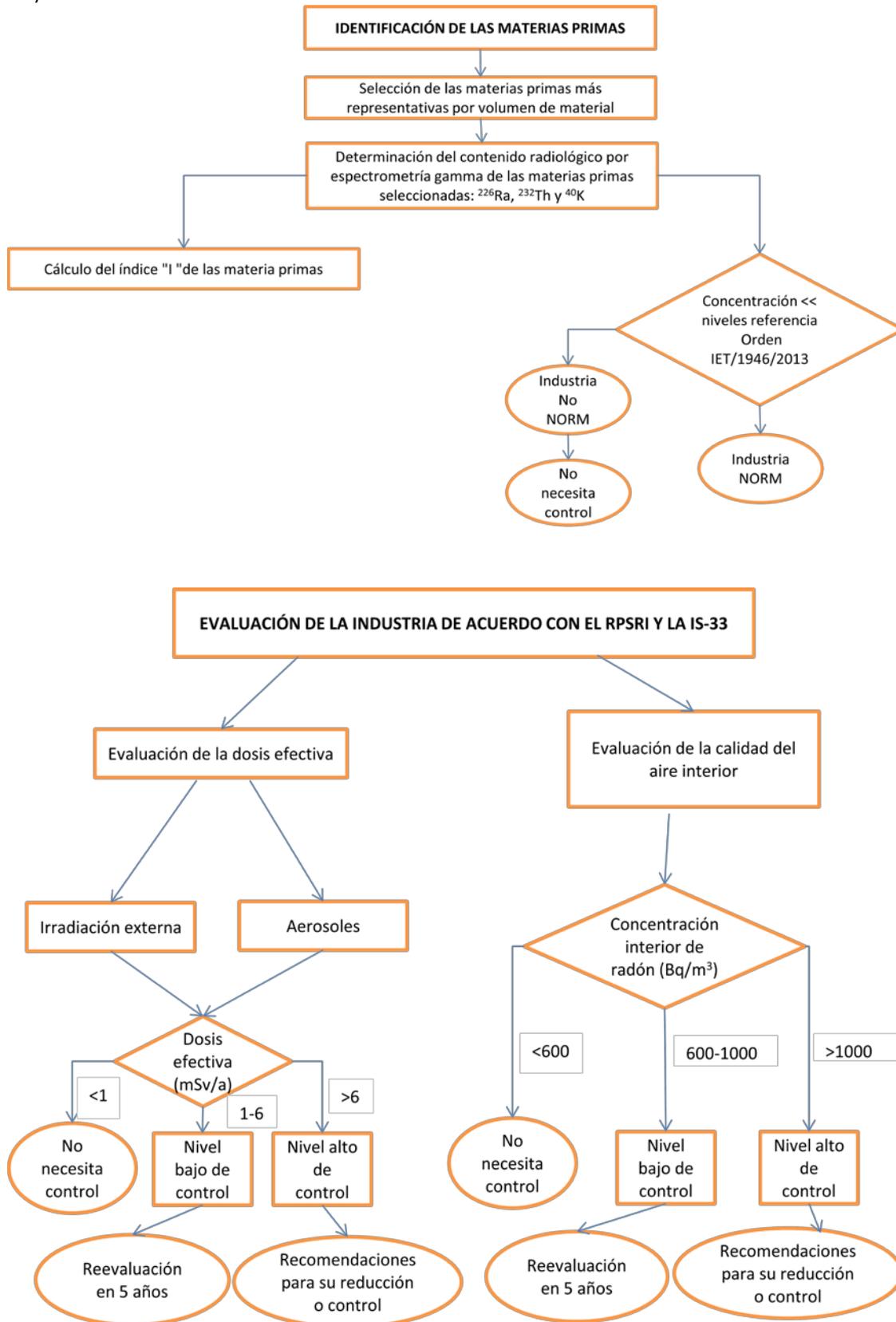


Figura 5.3: Esquema para la evaluación radiológica de una industria del granito.

Tras la aplicación de este protocolo, la empresa deberá estar en condiciones de realizar una clasificación radiológica de su actividad y conocer si su actividad está exenta o no de cualquier tipo de control radiológico posterior.

### **5.3 APLICACIÓN DEL PROTOCOLO PROPUESTO PARA LA EVALUACIÓN RADIOLÓGICA, EN LA EMPRESA SELECCIONADA PARA EL PRESENTE ESTUDIO.**

De acuerdo con los datos extraídos a lo largo de esta Tesis y siguiendo el protocolo planteado en este capítulo, se puede hacer la clasificación de la actividad de la empresa. El apartado administrativo de la empresa no aparecerá en este documento para preservar la confidencialidad de la empresa.

Los datos de partida utilizados para completar el registro del protocolo, son los siguientes:

1. La empresa transforma casi en exclusividad el granito Gris Quintana, con lo que las determinaciones radiológicas utilizadas son las correspondientes a este material.
2. Las actividades del  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  determinadas por espectrometría- $\gamma$ , son  $77\pm 4$  Bq/kg,  $75\pm 3$  Bq/kg y  $1110\pm 20$  Bq/kg, respectivamente.
3. El índice I calculado para este material es 1, lo que permitiría un uso intensivo del material sin ningún tipo de restricción y una libre circulación del material por el mercado europeo.
4. La actividad de la empresa no puede considerarse NORM, ya que no supera los valores establecidos para el  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$  establecidos en la Orden IET/1946/2013 en 500 Bq/kg para el  $^{226}\text{Ra}$ , 500 Bq/kg para el  $^{232}\text{Th}$  y 5.000 Bq/kg para el  $^{40}\text{K}$ .
5. El nivel máximo de radón medido en el interior de los vestuarios de la empresa (lugar más favorable para la acumulación del gas por ser una zona interior, ser un lugar cerrado y encontrarse sobre un batolito granítico) fue  $89,8\pm 4,2$  en invierno (marzo). Este nivel se encuentra muy por debajo de los  $600$  Bq/m<sup>3</sup> establecidos como nivel a partir del cual se debería efectuar algún tipo de control (IS-33).
6. La irradiación externa en la zona de la fábrica con presencia de trabajadores, descontando el nivel de fondo existente en el batolito, es de  $0,288$  mSv/a.
7. La dosis de radiación por inhalación de polvo calculada es de  $0,048$  mSv/a. Para este cálculo se considera que el tamaño de polvo respirado es de  $5$   $\mu\text{m}$ , todo el polvo que se respira procede del granito, el trabajador no utiliza medios de protección, el límite de exposición al polvo permitido por la reglamentación vigente es de  $3$  mg m<sup>-3</sup> (ITC2.0.02), la jornada de trabajo establecida es de  $8$  h ( $2.000$  h/a) y el volumen de aire respirado en la misma es de  $1,2$  m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (es decir,  $2.400$  m<sup>3</sup>).
8. La dosis efectiva recibida por los trabajadores, es la suma de la irradiación externa y la dosis por inhalación de aerosoles. Según lo anterior, esta dosis efectiva es de  $0,336$  mSv/a, inferior a  $1$  mSv/a, por ello, no son necesarias medidas de control adicionales en la empresa.

Con todos los estudios realizados se puede llegar a la conclusión de que la empresa estudiada, con la materia prima que utiliza (granito Gris Quintana), con su actual sistema productivo y sus actuales instalaciones, no debe efectuar ningún tipo de control radiológico extra y tendrá libre circulación de sus mercancías en la exportación de sus productos en el ámbito europeo. Atendiendo a las consideraciones y determinaciones anteriores, la figura 5.4, recoge la aplicación del protocolo y del registro propuesto para ello en este capítulo.

<b>EVALUACIÓN RADIOLÓGICA DE UNA INDUSTRIA DEL GRANITO (Pag. 2/...)</b>						
Materias primas						
Determinación del contenido radiológico de la materia prima (espectrometría-γ), Bq/kg.						
Roca 1	<sup>226</sup> Ra	<b>77 ± 4</b>	<sup>232</sup> Th	<b>75 ± 3</b>	<sup>40</sup> K	<b>1110 ± 20</b>
Roca 2	<sup>226</sup> Ra		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K	
Roca 3	<sup>226</sup> Ra		<sup>232</sup> Th		<sup>40</sup> K	
Cálculo del índice I						
$I = \frac{C_{Ra}}{300 (Bq/kg)} + \frac{C_{Th}}{200 (Bq/kg)} + \frac{C_K}{3000 (Bq/kg)}$						
Índices	I-1	<b>1,00 ± 0,02</b>	I-2		I-3	
Trabajadores						
Aerosoles. Cálculo de la dosis de radiación anual (variedad comercial con mayor índice I)						
Determinación del contenido radiológico de fracción respirable (espectrometría-γ), Bq/kg.						
<sup>226</sup> Ra	<b>77 ± 4</b>	<sup>232</sup> Th	<b>75 ± 3</b>	<sup>40</sup> K		<b>1110 ± 20</b>
Concentración polvo empresa (mg/m <sup>3</sup> )			<b>3 (Máximo legal, ante falta de datos)</b>			
<i>Dosis de radiación (mSv/a) = ∑ A × d × V × e</i>					<b>0,048 ± 0,006</b>	
A: Actividad del radionucleído (Bq/kg).			d: Exposición al polvo (mg/m <sup>3</sup> ).			
e: Factor conversión dosis, DCF. ICRP-119. (mSv/Bq).			V: Vol. anual de aire respirado (m <sup>3</sup> /a).			
Irradiación externa						
Método de medida	<b>Monitor de tasa de dosis, modelo FAG FHZ600A</b>					
Medidas (mSv/a)	Fondo (exterior zona minero industrial)					<b>1,943</b>
	Máximo medido en intalación, con presencia de trabajadores					<b>2,231</b>
Irradiación externa total descontando el nivel de fondo (mSv/a)						<b>0,288</b>
Radón						
Método de medida	<b>Integrador de corto tiempo, 2 días (cánister)</b>					
Identificación del lugar de medida (local +/- cerrado con presencia de trabajadores)				<b>Vestuarios de la empresa. (Junio / Marzo)</b>		
Medida verano (Bq/m <sup>3</sup> )	<b>10,6 ± 2,2</b>	Medida invierno (Bq/m <sup>3</sup> )		<b>89,8 ± 4,2</b>		
<b>CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL (Orden IET/1946/2013)</b>						
NO NORM		<b>X</b>	NORM			
<b>NIVEL DE CONTROL DEL RADÓN (IS-33)</b>						
No es necesario control		Nivel bajo de control			Nivel alto de control	
< 600 Bq/m <sup>3</sup>	<b>89,8 ± 4,2</b>	600-1000 Bq/m <sup>3</sup>			> 1000 Bq/m <sup>3</sup>	
<b>DOSIS EFECTIVA A LOS TRABAJADORES (IS-33)</b>						
(Irradiación externa+aerosoles)						
No es necesario control		Nivel bajo de control			Nivel alto de control	
< 1 mSv/a	<b>0,336</b>	1-6 mSv/a			> 6 mSv/a	

Figura 5.4: Hoja de registro para la actividad de la empresa estudiada.



## 6. CONCLUSIONES.

Este trabajo recoge el estudio realizado en el sector de las rocas ornamentales de Extremadura, concretamente en el granito, considerado en los últimos años como un sector estratégico para la economía de la región, por su importancia industrial, económica y social, en determinadas comarcas extremeñas. En la actualidad, existen un número importante de empresas graniteras en la región, todas ellas con una característica de PYMEs o MicroPYMEs.

- Extremadura y la zona de canteras analizadas en el presente estudio, se encuentra en el denominado Macizo Hespérico o Hercínico de la Península Ibérica, lugar en donde la presencia de materiales ígneos es muy abundante. En términos de radiactividad natural, estos materiales pueden poseer cantidades considerables de uranio y torio, lo que hace que estas zonas sean lugares con valores de radiación gamma natural relativamente elevados y donde la potencial exposición al radón, puede ser también importante.
- La presencia de radionucleidos naturales en los granitos extremeños es el motivo por el que se ha realizado una selección de las variedades comerciales más relevantes, para poder llevar a cabo su caracterización radiológica. Mediante espectrometría- $\gamma$  se determinaron las actividades del  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , obteniéndose como resultados rangos de actividades de 5-183 Bq/kg, 6-122 Bq/kg y 37-1633 Bq/kg, respectivamente. Con respecto al contenido en uranio de los granitos extremeños, se ha llevado a cabo la determinación del nivel de actividad (Bq/kg) del  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{238}\text{U}$  mediante espectrometría- $\alpha$ , en un total de 26 granitos seleccionados para su estudio, resultando rangos de actividades de 5-375 Bq/kg, 0,29-19 Bq/kg y 5-404 Bq/kg, respectivamente, para cada uno de los tres citados isótopos.
- Hay que destacar la buena correlación observada entre los niveles de  $^{238}\text{U}$  y  $^{226}\text{Ra}$  en las determinaciones efectuadas (coeficiente de correlación  $R=0,76$ ), como podría ser en principio esperable, al ser el  $^{238}\text{U}$  el elemento cabecera de la serie radiactiva de desintegración natural del uranio-radio y encontrarse en equilibrio secular. Por el contrario, la correlación entre los otros radionucleidos analizados y el contenido de uranio es significativamente menor ( $R=0,1$  y  $R=0,3$ , respectivamente), debido a que el U y Th pertenecen a series distintas, al igual que ocurre con el U y el K.
- La composición mineralógica y por tanto, la clasificación petrográfica de los granitos (atendiendo al contenido relativo en cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa), influye significativamente en los niveles de actividad de los mismos. A medida que aumentan los porcentajes de plagioclasas en la roca y por tanto disminuyen las otras componentes (cuarzo y feldespato alcalino), también disminuye la actividad de los diferentes radionucleidos analizados. Como regla general, los granitos más oscuros (con mayores contenidos en plagioclasas) son los que presentan menores actividades. Se ha podido comprobar, que la textura superficial de la roca (equigranular o porfídica) no influye inicialmente en la actividad de la misma.
- La granulometría final de la muestra ensayada influye significativa en el resultado final de su actividad. De las tres granulometrías ensayadas, la muestra más finas (tamaño de grano por debajo de 0,1 mm) es la que presenta una mayor actividad. La granulometría utilizada para el ensayo de referencia es la comprendida entre los 0,1 mm y los 0,25mm, cuya actividad presenta valores intermedios. La muestra con tamaño de grano mayor de 0,25 mm, es la que presenta menor nivel de actividad.

- Se ha calculado el Índice de Concentración de Actividad Gamma (Índice I) para los 41 granitos extremeños, con un rango de valores comprendido entre 0,07 y 1,4, y un valor medio de 0,87. Del análisis de los resultados obtenidos para este índice I en cada una de las variedades comerciales de granito, se puede concluir que todas las variedades analizadas presentan valores de I inferiores a 2, por lo que se podrían utilizar sin ningún tipo de restricción en revestimientos interiores, usos más habituales de los granitos extremeños. Además, gran parte de ellos se podrían utilizar de forma masiva, teniendo en cuenta algunas consideraciones, e incluso alguno de ellos podría utilizarse de forma masiva sin restricciones.
- En la determinación de la exhalación superficial de radón para los 25 granitos analizados, se ha obtenido un intervalo de valores que se sitúa entre los 0,09 y los 10,44 Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. El valor máximo obtenido en las mediciones de 10,44 Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, corresponde a un único granito, ya que el resto de valores mayores se encuentra siempre por debajo de 6,50 Bq m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. De los acabados superficiales analizados, el más frecuente para el granito es el acabado pulido, que es el que presenta una menor exhalación, debido principalmente al cierre de la porosidad superficial de la muestra que se produce durante la aplicación de este proceso mecánico. El resto de acabados analizados, presentan niveles de exhalación ligeramente superiores, debido a la microfisuración que se genera en la superficie del material durante dichos procesos de acabado. De entre ellos, los acabados “más agresivos” (los que generan una mayor rugosidad superficial, como el abujardado y el flameado) presentan unos niveles de exhalación mayor que el del corte de sierra.
- El desarrollo de gran parte del presente trabajo se ha centrado en el estudio de una empresa del sector del granito, que explota principalmente la variedad granítica conocida como Gris Quintana. Geológicamente, esta variedad comercial es un monzogranito biotítico (granito s.s. según la clasificación QAPF de Streckeisen), con un contenido aproximado del 33 % de cuarzo, 34 % de feldespato alcalino y un 30 % de plagioclasas, donde el SiO<sub>2</sub> y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son sus componentes mayoritarios (67,78 y 13,11 %, respectivamente).
- Los trabajadores de la empresa de granito analizada, se encuentran expuestos a tres vías principales de exposición, cuya importancia relativa depende de su localización dentro de la empresa y de la actividad que desarrollan. Estas vías de exposición son: la irradiación externa, la inhalación de aerosoles y de radón.
- Con el fin de poder establecer la dosis de origen natural debido al nivel radiactivo de fondo de la zona, se realizaron inicialmente una serie de determinaciones en una zona del propio batolito, libre de actividad minero industrial, obteniendo valores comprendidos entre 1,7 y 1,9 mSv/a.
- Como se ha podido comprobar, en cada una de las medidas efectuadas para determinar la irradiación externa en la zona del estudio, los valores más elevados corresponden a aquellos lugares en los que el monitor de medida de la tasa de dosis se encontraba más próximo a la materia prima granítica o donde existía un volumen mayor de dicho material: zona de acopios (producto final, bloques, etc.) o en la proximidad al frente de cantera. Estas zonas de mayor irradiación, son zonas poco transitadas y en las que el tiempo de permanencia de los trabajadores es mínimo. Además, en estas zonas los trabajadores suelen realizar su trabajo con la ayuda de maquinaria pesada (palas de carga, camiones, traspalé,..), que con frecuencia pueden atenuar al menos parcialmente dicha irradiación.
- Uno de los principales riesgos a los que están sometidos los trabajadores del sector del granito, es la de su exposición al polvo. Por la importancia que presenta el polvo en este sector, se procedió a realizar una analítica del contenido radiactivo de la fracción de polvo presente en la

actividad de la empresa. Como se ha podido comprobar, los trabajadores más expuestos a la exposición al polvo, son los que realizan su actividad en los talleres de labra, motivo por el cual la toma de muestras se centró en esta zona de las instalaciones de la empresa seleccionada para el estudio. Las determinaciones de la actividad (Bq/kg) para los diferentes radionucleidos en la fracción de polvo inferior a 45µm, fueron realizadas mediante espectrometría-α. A la hora de realizar una estimación de la potencial dosis de radiación interna a la que pueden estar sometidos los trabajadores del granito de la empresa del estudio, se ha procedido al cálculo de esta dosis efectiva. Para la aplicación de esta metodología simplificada y manteniendo un criterio conservador (acorde con las bases de la prevención), se parte de una serie de premisas: se considera que las series del uranio y del torio se encuentran en equilibrio (a no ser que exista información adicional), el tamaño de partícula de polvo utilizado es de 5 µm, todo el polvo que se respira procede del granito, el trabajador no utiliza medios de protección individual (EPis), el límite de exposición al polvo permitido por la reglamentación vigente es de 3 mg m<sup>-3</sup> (ITC2.0.02), la jornada de trabajo establecida es de 8 h (2.000 h/a) y el volumen de aire respirado en la misma es de 1,2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (es decir, 2.400 m<sup>3</sup>). En base a dichas premisas, la dosis por radiación obtenida debido a la inhalación de polvo por parte de los trabajadores de la industria analizada (en la que se transforma casi exclusivamente el granito Gris Quintana), es de 0,048 mSv/a., la cual se encuentra muy por debajo del límite de dosis efectiva, establecida en 20 mSv/a para los trabajadores expuestos a radiación ionizante y en 1 mSv/a para el público en general, entre los que en principio se encontrarían los trabajadores del granito (CE, Directiva 2013/59/EURATOM). De acuerdo a los cálculos realizados, el <sup>228</sup>Th es el radionucleido que mayor contribución tiene en la dosis de irradiación interna. El <sup>40</sup>K del polvo analizado, a pesar de presentar la mayor actividad de los radionucleidos analizados, es el que menor contribución aporta al cálculo de la dosis de radiación. La contribución de estos radionucleidos es la siguiente: <sup>228</sup>Th, <sup>230</sup>Th > <sup>232</sup>Th > <sup>234</sup>Th, <sup>235</sup>U > <sup>238</sup>U > <sup>226</sup>Ra ≈ <sup>210</sup>Po >> <sup>40</sup>K.

- La presencia de radón en la zona de estudio fue determinada utilizando dos metodologías diferentes. Una mediante detectores de carbón activo (cánister), que ofrecen un valor integrado para los días de exposición (normalmente 2 días); estas determinaciones se llevaron a cabo mensualmente de forma ininterrumpida, desde el día 16 de mayo de 2011 hasta el 18 de junio de 2012. Las otras determinaciones se realizaron mediante la utilización de un equipo portátil "Alpha-GUARD" que permite medir concentraciones ambientales de radón de forma puntual. El rango de valores obtenido en las determinaciones realizadas en los vestuarios varía entre los 10-90 Bq/m<sup>3</sup> y entre los 23-64 Bq/m<sup>3</sup>, en el caso de la oficina. Por regla general, se observa que los valores de concentraciones de radón obtenido en los vestuarios son ligeramente superiores a los obtenidos en la oficina. Los valores obtenidos tanto en la oficina como en los vestuarios, se encuentran significativamente por debajo de los 300 Bq/m<sup>3</sup>, establecidos por la reglamentación vigente para los lugares de trabajo (RPSRI, Real Decreto 1439/2010). Como cabía de esperar, en las áreas abiertas o semi-abiertas (zona de fábrica y zona de labra manual), las concentraciones de radón medidas son muy pequeñas, con valores que varían entre 5-14 Bq/m<sup>3</sup>. El taller de labra manual presenta únicamente como protección una cubierta y un lateral cerrado. La nave por su parte presenta cubierta y un cerramiento continuo perimetral, con grandes portones (no estancos) que se encuentran durante toda la jornada laboral abiertos.
- Otra parte importante de este estudio ha sido el análisis del impacto radiológico ambiental, que esta actividad minero-industrial origina en su entorno. El proceso de extracción y transformación de la piedra natural, genera una cantidad significativa de material estéril de diferente granulometría

(entre el 30 y el 40% de la producción total), lo que supone en una localidad como Quintana de la Serena la generación de unas 120.000 toneladas de residuo grueso y unas 27.000 toneladas de residuo fino, al año. Además, durante el desarrollo de su actividad, las empresas de la zona utilizan como refrigerante de la herramienta de corte y vía de evacuación de los lodos generados en un sistema cerrado, un volumen aproximado de agua que ronda los 10.000 L/día.

- En el análisis de los principales radionucleidos presentes en los residuos de la industria de granito analizada, se puede observar que los contenidos de  $^{210}\text{Po}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  y  $^{230}\text{Th}$  en la fracción fina (lodos), son menores que los contenidos obtenidos en la fracción gruesa de la roca. Los contenidos de  $^{234,238}\text{U}$  y  $^{228}\text{Th}$  en el lodo, parecen ser ligeramente inferiores a los contenidos en fracción gruesa del granito, aunque no es estadísticamente significativo teniendo en cuenta las incertidumbres de las medidas. Los contenidos de  $^{226}\text{Ra}$  y  $^{232}\text{Th}$  en el lodo y en la fracción gruesa son casi iguales. En el caso del  $^{40}\text{K}$ , se observa un ligero aumento en el lodo analizado. Estas variaciones en el nivel de actividad, sugiere que algunos de estos radionucleidos se pueden transferir al agua utilizada como refrigerante durante el proceso de transformación en la fábrica. Se puede comprobar que existe un ligero incremento en la actividad de los radionucleidos en el agua procedente de la balsa de decantación, debido a que a pesar de realizarse dicho proceso de separación (decantación y filtro prensa), sigue existiendo material sólido en suspensión, que contribuye al aumento observado del contenido radiológico. El contenido tanto en  $^{234,238}\text{U}$  como en  $^{40}\text{K}$  en el agua procedente de la balsa de decantación es superior al observado en el agua subterránea, lo que implica un enriquecimiento de estos radionucleidos después de su uso como refrigerante, debido a su capacidad de disolución.

- Gran parte de los residuos generados durante el proceso de transformación del granito (fracción gruesa y fracción fina) son considerados finalmente como desechos y depositados en escombreras para su gestión medioambiental. En estas escombreras, los residuos pueden estar sujetos a la intemperie, con lo que el contenido de radionucleidos de origen natural puede ser liberado parcialmente al medio ambiente y por lo tanto, su impacto radiológico depende del grado de asociación de estos radionucleidos de origen natural. Para su cuantificación se pueden considerar diferentes fracciones obtenidas mediante la aplicación de un procedimiento de extracción secuencial en el que se identifiquen las siguientes fracciones: soluble (F1), intercambiable (F2), extraíble con ácido diluido (F3), extraíble mediante ácido concentrado (F4) y residual (F5). Para que los radionucleidos puedan ejercer su toxicidad sobre un ser vivo, éstos deben encontrarse disponibles para ser captados por éste, es decir, deben ser biodisponibles. Las fracciones biodisponibles son aquellas que pueden ser fácilmente movilizadas o asimiladas por las plantas. Teniendo en cuenta esto, la fracción soluble en agua (F1) y la fracción intercambiable (F2) son generalmente consideradas como fácilmente asimilables por las plantas y por tanto fácilmente biodisponibles. La presencia de ácidos diluidos puede eliminar cationes en los complejos de cambio del suelo, además de poder disolver óxidos, hidróxidos, carbonatos y algunos compuestos alcalinotérreos del suelo. Así, la fracción ácido-diluido (F3) puede ser considerada como potencialmente biodisponible por las plantas. De esta forma, la fracción potencialmente biodisponible puede ser definida como la suma de las fracciones F1 + F2 + F3. La biodisponibilidad de los radionucleidos naturales analizados en los residuos de roca estéril gruesa y en los lodos son aproximadamente los mismos. Esta biodisponibilidad decrece de la siguiente manera:

Fácilmente biodisponibles (F1+F2):  $^{226,228}\text{Ra} > ^{234,238}\text{U} > ^{40}\text{K} \gg ^{210}\text{Po} \approx ^{228,230,232}\text{Th}$ .

Potencialmente biodisponibles (F1+F2+F3):  $^{226,228}\text{Ra} \approx ^{234,238}\text{U} \approx ^{228,230,232}\text{Th} > ^{210}\text{Po} > ^{40}\text{K}$ .

- Una aportación importante del trabajo desarrollado en esta Tesis, ha consistido en la definición de un protocolo para poder llevar a cabo el estudio del impacto radiológico de la actividad minero-industrial de la extracción y transformación del granito. Esta metodología facilitará a la empresa la realización de forma sencilla, de un completo análisis de su actividad:

- Se procederá a una caracterización radiológica de la materia prima principal (o las principales), lo que permitirá:
  - Calcular el Índice I del material ensayado (E.C. EU BSS, 2009).

Uso	Categoría (dosis por defecto correspondiente)	
	A ( $\leq 1$ mSv)	B ( $> 1$ mSv)
Materiales utilizados de forma masiva	$I \leq 1$ (A1)	$I > 1$ (B1)
Materiales superficiales	$I \leq 6$ (A2)	$I > 6$ (B2)

- Comprobar si su actividad industrial puede quedar exenta de clasificarse como NORM.
  - Se facilitará la evaluación de la industria de acuerdo al RPSRI y la IS-33, basado en el análisis de las distintas vías de exposición:
    - Niveles de referencia:
      - Dosis efectiva:  $< 1$  mSv/a: no es necesario control
      - Concentraciones de radón:  $< 600$  Bq/m<sup>3</sup>: no es necesario control (300 Bq/m<sup>3</sup>, en lugares de trabajo con elevada permanencia de miembros del público)
    - Por una parte se hará una evaluación de la dosis efectiva a la que se encuentra sometido el trabajador o los trabajadores más expuestos (irradiación externa e inhalación de aerosoles)
    - Por otra parte permitirá evaluar la calidad del aire interior de las instalaciones, analizando el grado de exposición de los trabajadores al radón, en aquellas zonas interiores más susceptibles de acumular dicho gas.
- La aplicación de este protocolo a la empresa utilizada para el estudio (una empresa considerada como representativa de la actividad minero-industrial para este sector en Extremadura, que extrae y transforma el granito Gris Quintana), ha permitido obtener las siguientes conclusiones:
  - El índice I calculado para este material es 1, lo que permitiría el uso intensivo de dicho material sin ningún tipo de restricción y una libre circulación del material por el mercado europeo.
  - La actividad de la empresa no puede considerarse NORM.
  - El nivel máximo de radón medido en la empresa es de 90 Bq/m<sup>3</sup> se encuentra muy por debajo de los 600 Bq/m<sup>3</sup> establecidos como nivel a partir del cual se debería efectuar algún tipo de control (IS-33).
  - La dosis efectiva recibida por los trabajadores es de 0,336 mSv/a, inferior a 1 mSv/a, por lo que no son necesarias adoptar medidas de control radiológico por parte de la empresa.
  - En base a todos los estudios realizados se puede llegar a la conclusión de que la empresa con la materia prima que utiliza (granito Gris Quintana), con su actual sistema productivo y sus actuales instalaciones, no debe efectuar ningún tipo de

control radiológico extra y tendrá libre circulación de sus mercancías, por lo que respecta a la exportación de sus productos en el ámbito europeo.

- Como conclusión final debe señalarse que el protocolo propuesto en esta Tesis puede ser una herramienta útil para el sector de las rocas ornamentales, a la hora de dar respuestas a las exigencias normativas en temas relacionados con la radiación natural existente en las materias primas pétreas.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

1. AENOR, 1998. UNE-EN 136:1998. Equipos de protección respiratoria. Máscaras completas. Requisitos, ensayos, marcado.
2. AENOR. UNE 1037:1983 Indicaciones de los estados superficiales en los dibujos. 1983.
3. AENOR. Varios años. Colección de normas UNE-EN, Piedra Natural.
4. AIDICO. 2011. Informe sectorial de la piedra natural del 2010. Observatorio del mercado de la Piedra Natural. <http://ompn.aidico.es/>
5. Amaral PG, Galembeck TM, Bonotto DM, Artur AC. 2012. Uranium distribution and radon exhalation from Brazilian dimension stones. *Applied Radiation Isotopes*. Elsevier. Apr;70(4):808-17.
6. Amorós R., Bolta J.M., Navarro E., Roldán C. 1995. Radon levels in the Valencian Community (Spain). I. Results in the Province of Valencia (1990-1991). *Journal of Environment Radioactivity*, 27 (2), 125-131.
7. Anjos, R.M.; Veiga, R.; Soares, T.; Santos, A.M.A.; Aguiar, J.G.; Frasca, M.H.B.O.; Brage, J.A.P.; Uzeda, D.; Mangia, L.; Facure, A.; Mosquera, B.; Carvalho, C.; Gomes, P.R.S. 2005. Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. *Radiat. Meas.* 39, 245–253.
8. Arvela, H., 1995 Seasonal variation in radón concentration of 3000 dwellings with model comparisons. *Radiation Protection Dosimetry*, 59 (1), 33-42.
9. Baeza, A.; Del Rio, M.; Miro, C.; Paniagua, J.M. 1992. Natural radioactivity in soils of the province of Caceres (Spain). *Radiation Protection Dosimetry*. Vol.45, No 1/4, pp. 261-263. Nuclear Technology Publishing.
10. Baeza, A., del Río, L.M., Jiménez, A. 1998. Procedure for simultaneous determination of <sup>223,224,226,228</sup>Ra by Alpha and Gamma Spectrometry. *Radiochim. Acta* 83, 53-60.
11. Baeza A., Navarro E., Roldán C., Ferrero J.L., Juanes D., Corbacho J.A., Guillén F.J. 2003. Indoor radon levels in buildings in the Autonomous Community of Extremadura (Spain). *Radiation Protection Dosimetry*, 103 (3), 263-268.
12. Baeza, A., Corbacho J.A. 2004. Comparative analysis of the in and ex situ determination of environmental radiation and dosimetry levels. *Radiat. Prot. Dosim.* 113 (1): 90-98.
13. Baeza, A., Fernández, M., Herranz, M., Legarda, F., Miró, C., Salas, A., 2006a. Removing uranium and radium from a natural water. *Water Air Soil Poll.* 173, 57-69.
14. Baeza, A., Guillén, J., Mietelski, J.W., Gaca, P., 2006b. Soil-to-fungi transfer of <sup>90</sup>Sr, <sup>239+240</sup>Pu, and <sup>241</sup>Am. *Radiochim. Acta* 94, 75-80.
15. Beretka, J., Mathew, P.J. 1985. Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. *Health Physics* 48, 87-95.
16. Bochicchio, F., Campos-Venuti, G., Piermattei, S., Neccetelli, C., Risica, S., 2005. Annual average and seasonal variations of residential radón concentration for all the Italian Regions *Radiation Measurements*, 40, 686-694.
17. Bohn, H., Mc Neal, B. and O'Connor, G. 1993. *Química del Suelo*. Ed. Limusa. Noriega editores.
18. Bolívar, J.P., García-Tenorio, R., Mas, J.L., Vaca, F., 2002. Radioactive impact in sediments from an estuarine system affected by industrial wastes releases. *Environ. Int.* 27 (8), 639-645.
19. Capik, M.; Yilmaz, A.O.; Vıcil, M. 2009. Investigation of mineralogical petrographical analysis of Harsit (Giresun) Granites and the level of natural radioactivity of granites used as building material. *Proceedings of 3rd Balkan Mining Congress*, Izmir, Turkey, October 1–3, 2009;

- Unver, B., Hindistan, M.A., Akcan, E., Eds.; The Chamber of Mining Engineering Publication: Ankara.
20. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). 2000. Proyecto MARNA. Mapa de radiación gamma natural. Madrid.
  21. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). 2004. Concentración de radón en viviendas españolas. Otros estudios de radiación natural. Colección de informes técnicos: 13.2004. Consejo de Seguridad Nuclear, 2004.
  22. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). 2011. IS-33. Criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural.
  23. Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). 2012. GS-11.03. Guía de seguridad. Metodología para la evaluación del impacto radiológico de las industrias NORM.
  24. Consejo de la Unión Europea (CE). 1990. Recomendación de la Comisión de 21-2-1990 relativa a la protección de la población contra peligros de una exposición a radón en el interior de edificios (90/143/EURATOM). D.O.C.E. L80, 26-28
  25. Consejo de la Unión Europea (CE). 1996. Directiva 96/29/EURATOM. Diario Oficial de la Unión Europea. 29/06/1996.
  26. Consejo de la Unión Europea (CE). 2014. Directiva 2013/59/EURATOM. Diario Oficial de la Unión Europea. 17/01/2014.
  27. Chen, C.J.; Lin, Y.M. 1996. Assessment of building materials for compliance with regulations of ROC. Environ. Int. 22, 221–226.
  28. Dirección General de Competitividad Empresarial, Gobierno de Extremadura. 2011. Directorio empresarial de Extremadura (DEMEX). <http://www.extremaduraempresarial.es/>
  29. El-Arabi A.M. 2007. Ra, Th, K concentrations in igneous rocks from eastern desert Egypt and its radiological implications. Radiat. Meas. 42, 94-100.
  30. El-Dine N.W., El-Shershaby A., Afifi S., Sroor A., Samir E. 2011. Natural radioactivity and Rare Earth elements in feldspar samples, Central Eastern desert, Egypt. Applied Radiation and Isotopes 69 (2011) 803–807
  31. El-Taher, A.; Uosif, A.M.; Orabi, A.A. 2007. Natural radioactivity levels and radiation hazard indices in granite from Aswan to Wadi El-Allaqi southeastern desert, Egypt. Radiat. Prot. Dosim. 1–7.
  32. European Commission (E.C.). 1999. Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials, Radiation Protection Report RP-112, EC, European Commission, Luxembourg.
  33. European Commission. Euratom Basic Safety Standards, EU BSS. 2009. European Commission Services considerations with regard to natural radiation sources in BSS Directive
  34. Ferdoas, S. Al – Saleh and Badriah Al-Berzan. 2007. Measurements of natural radioactivity in some kinds of marble and granite used in Riyadh Region. Journal of Nuclear and Radiation Physics, Vol. 2, No. 1, 2007, pp. 25-36
  35. Garzón Ruipérez L. (1992) Radón y sus riesgos. 1ª Ed. Oviedo, España. Universidad de Oviedo. Servicio de Publicaciones.
  36. Gascón, J.L., Crespo, M.T. y Aceña, M.L. 1989. Determinación de bajas actividades alfa de isótopos naturales de uranio, torio y radio, en aguas de consumo. Análisis de física 85.
  37. Harb, S.; El-Kamel, A. H.; Abd El-Mageed A. I.; Abbady A. and Wafaa Rashed. 2008. Concentration of U-238, U-235, Ra-226, Th-232 and K-40 for some granite samples in Eastern

- Desert of Egypt. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Environmental Physics Conference, 19-23 Feb. 2008, Aswan, Egypt
38. Internacional Commission on Radiological Protection (ICRP). 1977. Recommendations of ICRP, Publication 26, Pergamon Press, Oxford, U.K.
  39. Internacional Commission on Radiological Protection (ICRP). 1979. Limits for intakes of radionuclides by workers ICRP Publication 30 (part 1); Ann. ICRP 2 (3-4).
  40. International Commission on Radiological Protection (ICRP). 1990. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1991). Traducción al español por la Sociedad Española de Protección Radiológica. Madrid (1996).
  41. Internacional Commission on Radiological Protection (ICRP 65). 1993. Protection against <sup>222</sup>Rn at home and work. International Commission on Radiological Protection.
  42. Internacional Commission on Radiological Protection (ICRP). 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3).
  43. Internacional Commission on Radiological Protection (ICRP). 1994a Human respiratory tract model for radiological protection ICRP Publication 66; Ann. ICRP 24 (1-3)
  44. Internacional Commission on Radiological Protection (ICRP). 1994b Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers ICRP Publication 68; Ann. ICRP 24 (4).
  45. Internacional Commission on Radiological Protection (ICRP). 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).
  46. Instituto Geológico y Minero de España (IGME). 1971. Mapa Geológico a escala 1:200.000. Síntesis de la cartografía existente (Año 1971). Hoja 60 – Villanueva de la Serena.
  47. Instituto Geológico y Minero de España (I.G.M.E). 1985. Granitos de España. Madrid. Ministerio de Industria y Energía.
  48. Instituto Nacional de Estadística (INE). 1994. Clasificación Nacional de Ocupaciones (CNO-94). Madrid. <http://www.insht.es>
  49. Instituto Nacional de Silicosis (INS), 2001. Memoria de actividades 2001.
  50. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). 1999. NTP 533. El radón y sus efectos sobre la salud. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España.
  51. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). 2003. NTP 440. Radón en ambientes interiores. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, España.
  52. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). 2012. Límites de exposición profesional para agentes químicos en España.
  53. ISO 1302:1978. Technical drawings -- Method of indicating surface texture on drawings. 1978.
  54. ISO/FDIS 11665-7. Measurement of radioactivity in the environment - Air: radon-222 - Part 7: Accumulation method for estimating surface exhalation rate.
  55. ISO/IEC 17025. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Organization for Standardization. 2005.
  56. Ivanovich, M. and Harman, R.S. 1982. Uranium series disequilibrium. Applications to environmental problems. Oxford University Press. New York.
  57. Julivert, M., Fontboté, J.M., Ribeiro, A. y Nabais-Conce, L.E. 1972. Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares, 1:1.000.000. IGME, Memoria explicativa, 113 pag.

58. Junta de Extremadura. 2000. Piedra Natural de Extremadura. Consejería de Economía Industria y Comercio. Dirección General de ordenación Industrial Energía y Minas.
59. Kennedy V.H., Sanchez A.L., Oughton D.H., Rowland A.P. 1997. Use of single and sequential chemical extractants to assess radionuclide and heavy metal availability from soils for root uptake. *Analyst*, 1997, 122, 89R-100R.
60. Kitto, M.E., Haines, D.K., Menia T.A. 2009. Assessment of gamma-ray emissions from natural and manmade decorative stones. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. Volume 282, N º2. 490-413.
61. Kleeman, J. D. and Lovering, J. F. 1967. Uranium Distribution in Rocks by Fission-Track Registration in Lexan Plastic, *Science*, 156, 512–513.
62. Krieger, R. 1981. Radioactivity of construction materials. *Betonwerk Fertigteil-Tech.* 47, 468-473.
63. Krouglov, S.V., Kurinov, A.D., Alexakhin, R.M., 1998. Chemical fractionation of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{144}\text{Ce}$  in Chernobyl-contaminates soils: an evolution in the course of time. *J. Environ. Radioactiv.* 38, 59-76.
64. López Jimeno, C. 1995. Manual de rocas ornamentales: prospección, explotación, elaboración y colocación. Madrid: Entorno Gráfico.
65. Martín Materranz, J.L. 2004. Concentraciones de radón en viviendas españolas. Otros estudios de radiación natural. Colección de informes técnicos 13. Publicaciones CSN. Madrid.
66. Ministerio de Fomento. 2006. Código Técnico de la Edificación. R.D. 314/2006. BOE 74, 28/3/2006.
67. Ministerio de Fomento. 2009. Ley de Ordenación de la Edificación. Ley 38/1999. BOE 266, 06/11/1999.
68. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. 2007. Orden ITC/2585/2007. Instrucción Técnica Complementaria 2.0.02. Protección de los trabajadores contra el polvo, en relación con la silicosis, en las industrias extractivas. Reglamento general de normas básicas de seguridad minera. B.O.E. nº 215. 7 de septiembre de 2007.
69. Moura CL, Artur AC, Bonotto DM, Guedes S, Martinelli CD. 2011 Natural radioactivity and radon exhalation rate in Brazilian igneous rocks. *Appl Radiat Isot.* 2011 Jul; 69(7): 1094-9. doi: 10.1016/j.apradiso.2011.03.004. Epub 2011 Mar 12.
70. Mustonen R., Pennanen M., Annamäki M. and Oksanen E. 1997. Enhanced Radioactivity of Building Materials. For the European Commission, Contract No 96-ET-003 (draft final report).
71. Orden IET/1946/2013. Gestión de los residuos generados en las actividades que utilizan materiales que contienen radionucleidos naturales. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. BOE 254. 23 de octubre de 2013.
72. Orgun Y. and Altinsoy N., 2005. Natural radioactivity levels in granitic plutons and groundwaters in southeast part of Eskisehir, Turkey. *Appl. Radiat. Isot.* 63, 267-275.
73. OSNET Editions vol. 9. 2004. Complementary technologies for stone processing. Edited by S. Midha, I. Paspaliaris, Athens.
74. Papaefthymiou, H., 2003. Indoor radon levels and influencing factors in houses of Patras, Greece. *Journal of Environmental Radioactivity*, 66, 247-260.
75. Pavlidou, S.; Koroneos, A.; Papastefanou, C.; Christofides, G.; Stoulos, S.; Vavelides, M. 2006. Natural radioactivity of granites used as building materials in Greece. *J Environ. Radioact.* 89, 48–60.

76. Pavlotskaya, F.I., 1974. Migration of radioactive products from global fallout in soils. Atomizdat, Moskow. (in Russian).
77. Peake, R.T. 1998. "Radon and geology in the United States". Radiat. Prot. Dosim. 24.
78. Pereira, D.; Neves, L.; Pereira, A.; González-Neila, C. 2011. Natural radioactivity in ornamental stones: an approach for its study in known samples from Iberia. Bulletin of Engineering and the Environment 70:543–547.
79. Pereira, D.; Neves, L.; Pereira, A.; Peinado, M.; Blanco, J.A. and Tejado, J.J. 2012. A radiological study of some ornamental stones: bluish granites from Extremadura (Spain). Natural Hazards and Earth System Sciences 12: 395-401.
80. Pérez-Estaún, A. y Bea, F, editores. 2004. Macizo Ibérico. En: Geología de España (J.A. Vera, Ed.). SGE-IGME, Madrid, 19-230.
81. Perianes Valle, A.; Alcalde Molero, C.; González, J.M.; Ollero, A.; Tejado Ramos, J.J. y Mota López, M.I. 2004. Atlas de las Rocas Ornamentales de Extremadura. Consejería de Economía y Trabajo. Junta de Extremadura. 152 pág.
82. Platford R.F., Joshi S.R. J. 1986. The chemistry of uranium and related radionuclides in Lake Ontario waters. Radioanal. Nucl. Chem., 1986, 106(6), 333.
83. Quindós, L. S., Soto J., Fernández P.L. 1991. Medida de la concentración de radón en el interior de viviendas españolas. Revista Española de Física, 5 (1).
84. Quindós, L.S., Soto J., Fernández P.L. 1992. Geología y niveles de radón en viviendas españolas. Revista Española de Física, 6 (1).
85. Quindós, L.S. 1995. Radón: un gas radiactivo de origen natural en su casa. CSN. Servicio de publicaciones de la Universidad de Cantabria.
86. Real Decreto (R.D.). 1439/2010. Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizante (RPSRI). BOE 279 del 18/11/2010.
87. Rowe E.J., Kelly M., Price L.E. 2002. Weather system scale variation in radon-222 concentration of indoor air. The science of the total environment, 284, 157-166.
88. Sakoda, A., Hanamoto, K., Ishimori, Y., Nagamatsu, T. & Yamaoka, K. 2008. Radioactivity and radon emanation fraction of the granites sampled at Misasa and Badgastein. Applied Radiation and Isotopes, 66 (2008), 648-652. ScienceDirect. Elsevier.
89. Schumann, R. R.; Owen, D. E.; Asher-Bolinder, S. 1992. Effects of weather and soil characteristics on temporal variations in soil gas concentrations. In: Geologic Controls on Radon (A.E. Gates and L.C. Gundersen Eds.), Geol. Soc. Amer., Spec. Pap. 271: 65-72.
90. Sill, C.W., 1987. Precipitation of actinides as fluorides or hydroxides for high-resolution alpha spectrometry. Nucl. Chem. Waste Managem., 7(3-4), 201-215.
91. Steck, D. 2009. Pre and post market measurements of gamma radiation and radon emanation from large sample of decorative granites. In: Proceedings of the American Association of Radon Scientists and Technologists 2009 International Symposium, St. Louis, USA.
92. Streckeisen, A. L. 1974. Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks. Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Geologische Rundschau. Internationale Zeitschrift für Geologie. Stuttgart. Vol.63, p. 773-785.
93. TAEK (Turkish Atomic Energy Authority). 2010. Evaluation of radioactivity of granites and marbles used as building materials. Report was presented to Grand National Assembly of Turkey.

94. Turgay Onargan, Filiz Gür, Erol Kaya & Sinem Güneri. 2012. Assessment of natural radioactivity in commercial granites used in Turkey, *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 47:12, 1825-1830
95. Turtiainen, T.; Weltner, A. 2007. Assessment of dose during the life cycle of natural stone production. *Radiat. Prot. Dosim.* 1–5.
96. Tzortzis, M.; Tsertos, H.; Christofides, S.; Christodoulides G. 2003. Gamma radiation measurements and dose rates in commercially-used natural tiling rocks (granites). *Journal of Environmental Radioactivity* 70 (2003) 223–235. Elsevier.
97. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2000. Sources and Effects of Ionising Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations. New York.
98. Universidad de Extremadura (UEX). 2009. La innovación en la empresa extremeña: informe 2009. Vicerrectorado de Investigación, Innovación e Infraestructura Científica. Universidad de Extremadura.
99. Vera, J. A. 2004. *Geología de España*. Sociedad Geológica de España e Instituto Geológico y Minero de España. 884 pag.
100. Wafaa, Arafa. 2004. Specific activity and hazards of granite samples from the Eastern Desert of Egypt. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2004, 75(3), 315-327.
101. Walley El-Dine, N., El-Shershaby, A., Ahmed, F., Abdel-Haleem, A.S., 2001. Measurement of radioactivity and radon exhalation rate in different kinds of marbles and granites. *Appl. Rad. Isot.* 55, 853. WHO, 2009. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. World Health Organization. WHO Press, Geneva, Switzerland.
102. Wildgusdt M.A., McDonald P., White K.N. 1998. Temporal changes of  $^{210}\text{Po}$  in temperate coastal waters, *Sci. Total Environ.* 1998, 214, 1-10.
103. Wolery T. J. 1992. EQ3/6, A Software Package for Geochemical Modeling of Aqueous Systems: Package Overview and Installation Guide: UCRL-MA-110662-PT-I, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.
104. Xinwei, L.; Lingqing, W.; Xiaodan J. 2005. Radiometric analysis of Chinese commercial granites. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 267, No.3 (2006) 669–673.