

VNiVERSiDAD D SALAMANCA

FACULTAD DE CIENCIAS

GRADO EN INGENIERÍA GEOLÓGICA



TRABAJO FIN DE GRADO

RADIOACTIVIDAD NATURAL DEL
GRANITO DE VILLAVIEJA.
REPERCUSIONES CIENTÍFICAS,
ECONÓMICAS Y SOCIALES.

SONIA FUENTES SEISDEDOS

2015



VNIVERSIDAD
D SALAMANCA

RADIATIVIDAD NATURAL DEL
GRANITO DE VILLAVIEJA.
REPERCUSIONES CIENTÍFICAS,
ECONÓMICAS Y SOCIALES.

Autora:

Sonia Fuentes Seisdedos

Tutora y Cotutores:

María Dolores Pereira Gómez

Sergio Hernández Gutiérrez

Alcides J. S. Castilho Pereira

Departamento de Geología

Área de Petrología y Geoquímica

Grado en Ingeniería Geológica

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

D. Sergio Hernández Gutiérrez, Director del Área de investigación de la empresa Minas y Geología S.L.

D. Alcides J. S. Castilho Pereira, Director del Área de Mineralogía, Petrología y Geoquímica del departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Coimbra.

CERTIFICAN:

Que el Trabajo Fin de Grado titulado “Radiactividad natural de granito de Villavieja. Repercusiones científicas, económicas y sociales” ha sido realizado bajo su tutela por Dña. Sonia Fuentes Seisdedos.

Salamanca, a de Septiembre de 2015

Dra. D. María Dolores Pereira Gómez

Dr, D. Sergio Hernández Gutiérrez

Dr. D. Alcides J. S. Castilho Pereira

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a la Dra. Dña. María Dolores Pereira por todo su esfuerzo, dedicación, entrega y confianza en mí desde el primer día.

Quiero agradecer también especialmente a mis cotutores, D. Sergio Hernández Gutiérrez y a Dr. D. Alcides Castilho Pereira por darme esta oportunidad única y poner a mi disposición toda su experiencia y sabiduría para ayudarme en la realización de este trabajo.

Gracias a la empresa “Merchan S.L.” por estar en todo momento a mi disposición en lo que he necesitado.

Gracias a mi familia por su confianza durante todos estos años.

RESUMEN

El granito de Villavieja es una piedra natural de gran importancia en la economía extractiva de la zona. Aflora en la parte oeste de la provincia de Salamanca, dentro de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Varisco. En el presente trabajo, se ha realizado un estudio de campo y de laboratorio para estudiar la radiación natural que dicho granito puede emitir, tanto como placa como en polvo. A pesar de que los valores de exhalación de Rn son admisibles para este tipo de roca, se sugiere que se hagan ensayos de la exhalación dependiendo del tipo de acabado. Esto podría ser un valor añadido a la hora de comercializar este granito, pues el uso en interiores requiere una tasa de exhalación más baja. Aunque en la actualidad todavía no se aplica una norma para la radiactividad natural de la piedra natural, la legislación está preparada para su implementación en un futuro inmediato en toda Europa.

ABSTRACT

Villavieja Granite is a natural stone, having great importance in the extractive economy of the area. It is located in the western part of Salamanca province, within the Centro-Iberian Zone of the Iberian Variscan Belt. This work presents a study with field and laboratory work on the natural radiation that this granite may emit either as slab or as powder. Although Rn exhalation values are admissible for this type of rock, it is suggested that further exhalation tests are done on different type of slab finishes. This could be an added value when marketing this granite, for indoor use requires a lower rate of exhalation. Although there is no specific norm applied to the natural radioactivity in natural stones, the law can be implemented any time in the near future within Europe.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 RADIATIVIDAD ARTIFICIAL	4
1.2 RADIATIVIDAD NATURAL.....	5
1.3 EL ÁTOMO.....	5
1.4 TIPOS DE RADIACIÓN	8
1.5 RADIACIONES IONIZANTES.....	9
1.6 MEDIDA DE RADIATIVIDAD	12
1.7 VIDA MEDIA DE LOS RADIONUCLEIDOS Y CADENAS DE DESINTEGRACIÓN	13
1.8 LEGISLACIÓN	15
2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	18
3. MARCO GEOLÓGICO	20
4. METODOLOGÍA DE TRABAJO	25
4.1 TRABAJO DE CAMPO	25
4.2 TRABAJO DE LABORATORIO.....	26
4.3 TRABAJO DE GABINETE	31
5. RESULTADOS.....	32
5.1 ANÁLISIS QUÍMICO	32
5.2 EXHALACIÓN DE RADÓN AL AIRE	36
5.3 ANÁLISIS MINERALÓGICO	37
6. CONCLUSIONES	39
7. BIBLIOGRAFÍA	40

1. INTRODUCCIÓN

La radiactividad natural es inherente a la vida sobre el planeta Tierra. Estamos expuestos a radiaciones procedentes de varias fuentes naturales, desde las que tiene origen en el espacio a las asociadas al sustrato sobre el que vivimos.

La exposición a las radiaciones ionizantes, cualquiera que sea su origen, puede causar efectos perjudiciales sobre la salud y debe ser valorada en detalle. La exposición a dosis de radiación que recibe la población procede de un conjunto de fuentes, clasificándolas por su origen en artificiales y naturales. Estas fuentes tienen distinta intensidad y está perfectamente catalogada. Las rocas emiten radiactividad natural y ésta está relacionada con su mineralogía, fundamentalmente asociada a determinados minerales accesorios.

El principal **objetivo** de este trabajo es el estudio de la radiación natural que el granito de Villavieja puede emitir, tanto como placa como en polvo. Este objetivo está en relación directa con la promoción del granito de Villavieja como piedra natural y su importancia en la economía extractiva de la zona. También es de importancia obtener unos datos fiables de la exhalación de Rn del granito para poder darlo a conocer a la ciudadanía relacionada con el mismo, bien por el tema comercial de su extracción, bien porque son habitantes de la zona.

El estudio de la radiactividad natural en materiales de construcción, en concreto en el caso de las rocas naturales, ha sido un tema de escasos estudios y que por lo tanto presenta un corto historial en nuestro conocimiento. Como **antecedentes** al mismo y como base de su desarrollo se pueden citar los siguientes trabajos:

Higgy et al. (2000) realizaron un estudio con la intención de medir la radiactividad de algunos materiales egipcios usados en la construcción de paredes y suelos.

Guerrero y Llorente (2002) hicieron un estudio sobre la variabilidad petrográfica y geoquímica de los granitoides del SW de Salamanca, incluyendo algunos aspectos relevantes del granito de Villavieja.

Anjos et al (2005) realizaron un estudio muy completo sobre una selección de muestras brasileñas y abrió el camino al estudio de la protección radiológica cuando las rocas graníticas son usadas como baldosas o revestimientos.

Lu y Zhang (2007) publicaron un estudio de la radiactividad natural en rocas del parque natural "Montañas Cuihua" en China. Estos autores midieron las concentraciones de radionucleidos naturales de Ra, Th y K mediante un detector NaI. El valor de la actividad equivalente de todas las muestras resultó estar por debajo del límite de 370 Bq Kg^{-1}

González Neila (2008) realizó un estudio bastante amplio sobre la radiactividad natural en los materiales de construcción como proyecto fin de carrera, y se observó que cada roca natural estudiada tenía un comportamiento distinto en cuanto a exhalación de radiactividad natural.

Manteca Alvarez (2011) estudió radiactividad de las rocas ornamentales de Castilla y León, determinando la dosis efectiva de radiación que pueden provocar estas rocas en las personas, y determinar el correcto uso como materiales de construcción. También estableció una relación entre la radiactividad natural de la roca y su mineralogía.

Ferrero Vaquero (2013): realizó una caracterización radiológica del Rojo Sayago, determinando la dosis efectiva de radiación que puede provocar esta roca, aplicando experimentos de medida en muestras analíticas de distinto tamaño.

Tejado Ramos (2014) analizó la extracción y transformación de granitos como una actividad de diseño de protocolo, en la que se muestra que una misma roca dependiendo de su acabado superficial tiene diferentes valores de exhalación. Este trabajo es de gran importancia social porque está relacionado con la tasa de exhalación de un determinado granito, el granito de Quintana de la Serena, y la dosis que pueden recibir los trabajadores de la cantera y de los centros de elaboración del granito para su comercialización.

El presente trabajo se divide en una primera parte descriptiva de lo que es la radiación, tanto natural como artificial, y sus efectos y una segunda parte en la que se expone la posible problemática de una piedra natural que emita radiación una vez utilizada en construcción, a la luz de la normativa europea sobre radiación natural. Termina el trabajo con una serie de recomendaciones y propuesta de seguimiento de estudio.

El trabajo se enmarca en los contenidos de diversas asignaturas seguidas durante la carrera, sobre todo la asignatura obligatoria de rocas industriales y la optativa relacionada con los residuos radiactivos, en la que se explica la física de partículas y las radiaciones ionizantes.

1.1 RADIATIVIDAD ARTIFICIAL

Entre las posibles fuentes de radiactividad artificial contribuyentes a la dosis de radiación que recibe la población en general y algunos colectivos en particular (por ejemplo, trabajadores de centrales nucleares, profesionales de la medicina nuclear, etc.), se encuentran las exposiciones médicas, el ciclo de combustible nuclear, incluyendo las operaciones de centrales nucleares, las antiguas explosiones nucleares en atmósfera, causantes de contaminación a escala mundial y los accidentes nucleares con consecuencias ambientales.

Otras fuentes de uso industrial limitan su posible exposición a los profesionales que las manejan, sin afectar a la población general, salvo pérdida de control o accidente. Con excepción de las exposiciones médicas, cuya contribución a la dosis promedio se estima en 0,4 mSv al año, el resto de fuentes artificiales tiene escasa contribución a la dosis promedio de la población (Fig.1). A pesar de ello, la preocupación social es mucho mayor para este tipo de emisiones, aunque sean menos contribuyentes a la exposición total.

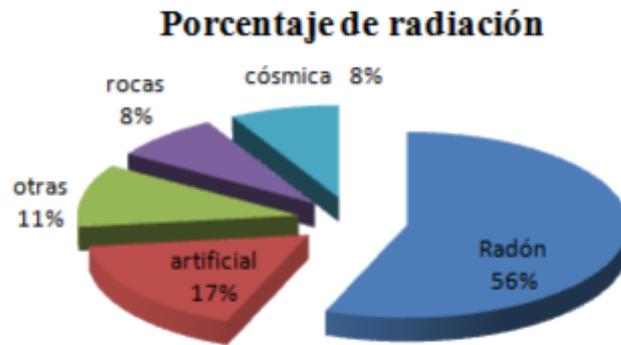


Figura 1. Distribución de las radiaciones recibidas por el ser humano. (Fuente: Laboratorio de radiactividad natural de la Universidad de Coimbra).

1.2 RADIATIVIDAD NATURAL

El proceso de desintegración radiactiva explica la existencia de muchos elementos radiactivos en el medio ambiente. De hecho, hasta la invención del tubo de rayos X, en 1895, la única radiación que existía era la natural.

El ser humano vive en un mundo donde recibe radiación cósmica procedente del sol y otras fuentes de energía. De la radiación cósmica, que procede del espacio, sólo llega al suelo una fracción, ya que en su mayor parte es detenida por la atmósfera. La exposición debida a las fuentes terrestres, tanto interiores como exteriores, procede de los elementos radiactivos naturales presentes en los materiales de la corteza terrestre y su distribución en otros componentes de la biosfera. Dichos elementos son los llamados primordiales, como el K, y los componentes de series radiactivas naturales cuyos elementos U y Th existen en la tierra desde su formación dados sus muy largos periodos de desintegración.

1.3 EL ÁTOMO

La materia se encuentra formada por átomos que suelen ser estables. Sin embargo, cuando algunos de ellos se alteran (pierden alguna de sus partes) y emiten radiaciones que transportan energía dan origen a la radiactividad. El hallazgo de la radiactividad supuso una auténtica revolución del pensamiento científico, que modificó el modelo del universo que se tenía y abrió una nueva

rama de la física. En 1896, el físico francés *Enrique Becquerel* descubrió la cualidad que posee el Uranio de emitir ciertos *rayos invisibles*, y en 1898, el matrimonio *Curie*, descubrió el Radio, un nuevo elemento. A partir de estos dos logros se dedujo que el átomo debía tener una estructura muy compleja.

Como la radiactividad es resultado de la transformación del átomo, para poder aclarar su naturaleza es importante detallar lo que sucede dentro de estos. Los átomos están constituidos de tres tipos de partículas “subatómicas” que son: protones, neutrones y electrones. El núcleo de cada átomo engloba los protones que están cargados positivamente, y los neutrones que no tienen carga eléctrica; ambos son muy similares en tamaño, casi idénticos, solamente difieren en su carga eléctrica. Alrededor de ellos encontramos los electrones, con carga negativa. El átomo normalmente es eléctricamente neutro, es decir, tiene la misma proporción de protones que de electrones, contrarrestándose unos con otros. Si se incrementa el número de electrones, el átomo se carga negativamente y si se disminuyen se carga positivamente. Esta partícula con carga se denomina ión.

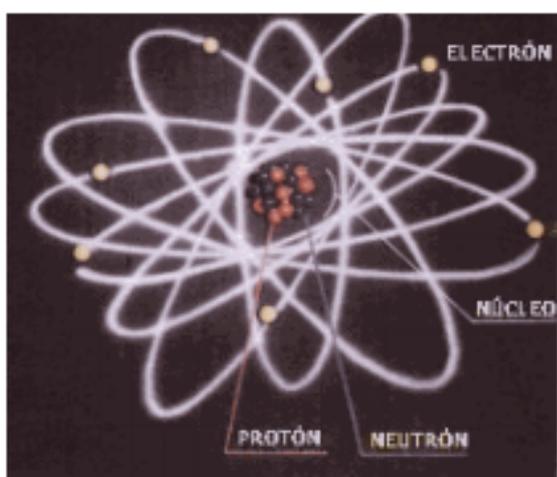


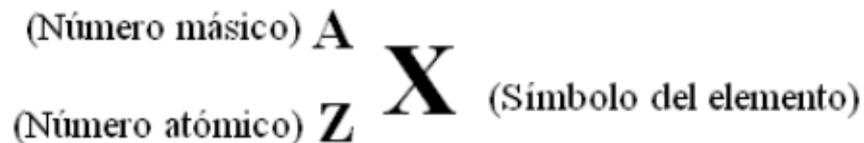
Figura 2. Estructura del átomo (Jorba Bisbal, Ortega Aramburu, 2010)

Aunque el tamaño de los átomos de cada elemento es ínfimo (su diámetro es igual a una cienmillonésima de centímetro), forma un conjunto extremadamente complicado, con una estructura similar a nuestro sistema solar.

Elementos, isótopos, nucleidos y radionucleidos

El número de protones de un núcleo de un átomo determina el elemento químico. Se denomina número atómico del elemento y se nombra con la letra

Z. Sin embargo, cada elemento químico puede tener varios núcleos diferentes, es decir, pueden tener distinto número de neutrones en el núcleo y, por tanto, distinta masa, recibiendo el nombre de isótopos del elemento. Estos se reconocen por un número llamado “número másico” A, que es la suma de los protones y los neutrones en el núcleo. De modo que el número de neutrones es la diferencia entre el número másico y el número atómico ($N = A - Z$). El número atómico (Z) determina a que elemento químico pertenece un átomo y el número másico (A) define a que isótopo del elemento.



Por ejemplo, el Uranio tiene dos isótopos comunes: ^{235}U (92 protones y 143 neutrones) y ^{238}U (92 protones y 146 neutrones). Por eso, aunque existen 90 elementos químicos naturales y 28 artificiales, hay cientos de átomos diferentes debido a que cada elemento puede tener numerosos isótopos naturales.

Se denomina **nucleido** a todos los núcleos que tienen la misma cantidad de protones (Z) que de neutrones (N). Es decir, al igual que todos los átomos con el mismo Z (protones) pertenecen al mismo elemento, todos los elementos con la misma composición de protones y neutrones (Z y N) corresponden al mismo nucleido (ej., ^{12}C , con 6 protones, 6 neutrones y masa 12). Existen aproximadamente 1.440 nucleidos conocidos de los cuales 340 se hallan en la naturaleza y alrededor de 1.100 se han obtenido en laboratorios.

A pesar de que los protones al estar cargados positivamente están continuamente repeliéndose los unos a los otros, el núcleo permanece unido gracias a una fuerza llamada “interacción nuclear fuerte” entre estos y los neutrones. La mayor parte de los núcleos están en una situación estable manteniéndose unidos pero en algunas ocasiones protones y neutrones no consiguen permanecer en equilibrio y evolucionan hasta lograr otra forma más estable liberando ciertas partículas. Esto es lo que conocemos como **radiactividad** y dichos átomos son los **isótopos radiactivos**. Parte de la energía que se libera cuando el átomo logra su forma más estable es la denominada **radiación**. Los átomos o los propios nucleidos que se alteran y pasan a ser otros nucleidos se les denomina **radionucleidos**.

A su vez, la nueva estructura tomada por ese átomo también puede ser inestable o radiactiva y continuar decayendo. Estas transformaciones persisten hasta que el átomo alcanza una forma estable.

Existen alrededor de 280 nucleidos estables aunque generalmente son inestables o **radiactivos**.

1.4 TIPOS DE RADIACIÓN

La radiación puede tener distintas apariencias:

- ✚ **Radiactividad alfa:** cuando se expulsa una partícula alfa, el núcleo va decaer debido a la pérdida de dos protones y dos neutrones de modo que el átomo evoluciona a un elemento diferente que tiene un número atómico con dos valores menos. Esta radiación se produce en los elementos pesados.
- ✚ **Radiactividad beta:** la partícula beta es expulsada descargando el exceso de energía cuando un neutrón se transforma en un protón, emitiendo un electrón y un antineutrino (antipartícula correspondiente al neutrino, es decir, tienen la misma masa, el mismo spin pero helicidad contraria). Se crea otro elemento químico que contiene un protón más.
- ✚ **Radiactividad gamma:** emisión de un fotón (partícula elemental de masa cero portadora de todas las formas de radiación electromagnética) que conlleva un reajuste de protones o neutrones del núcleo para pasar a un estado de menor energía y, por tanto, más estable (la proyección de partículas alfa y beta no siempre dejan al núcleo en su estado más estable y el exceso de energía remanente puede ser liberada como rayos gamma). Los distintos tipos de radiación reaccionan con la materia de diferente forma penetrando unas más que otra.

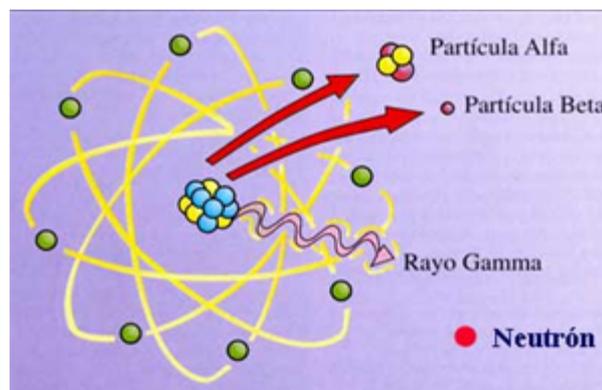


Figura 3. Tipos de radiación (Quindós Poncela, 1995)

1.5 RADIACIONES IONIZANTES

Los tres modelos de radiaciones mencionadas anteriormente tienen aptitudes para hacer que el material que traspasan se “ionice”, debido a ello reciben el nombre de radiaciones ionizantes. Esto significa que al interactuar con la materia que las rodea pueden producir átomos eléctricamente cargados, es decir, iones. También pueden romper o crear enlaces químicos y dañar las células de los organismos vivos.

Aparte de las tres radiaciones explicadas podemos encontrar otros dos tipos de radiaciones ionizantes:

- ✚ **Rayos X:** Son semejantes a la radiación gamma pero tienen menos energía. Se producen en las máquinas de rayos X y desaparecen al desconectar la máquina.
- ✚ **Emisión de neutrones:** Se produce durante algunos procesos nucleares como la “fisión” dentro de un reactor en el cual el núcleo del átomo pesado es dividido en dos liberando neutrones. Estos neutrones no tienen carga eléctrica pero sí un gran poder de penetración.

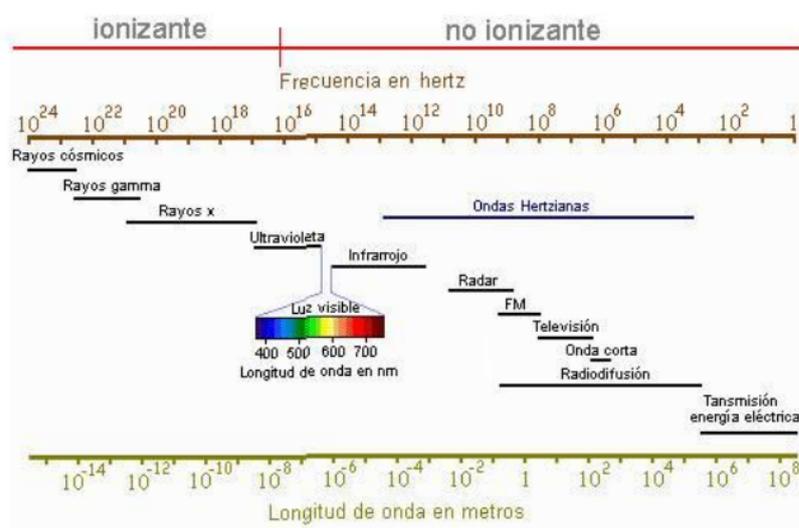


Figura 4. Espectro magnético (Frenzel, 2003)

Propiedades de los tipos de radiación

✚ **Partículas alfa:** Son partículas relativamente grandes y pesadas. Están constituidas por dos protones y dos neutrones. Su energía se disipa durante el movimiento de modo que las causas por las que se detiene pueden ser:

a) Consecuencia de la interacción con otras partículas cargadas debido a que es una partícula cargada eléctricamente (positiva)

b) Colisión con otras partículas. No pueden traspasar la piel o una hoja de papel, sólo pequeñas distancias en el aire. Una sustancia que emite partículas alfa puede ser ingerida o inhalada ocasionando lesiones graves en una región concreta de los tejidos.

✚ **Partículas beta:** con menos masa y un movimiento más rápido. Tienen un mayor poder de penetración que las alfa, aunque pueden ser detenidas por una lámina de aluminio. Son partículas con un electrón libre de modo que están cargadas eléctricamente (negativas).

✚ **Rayos gamma, rayos X y neutrones:** La energía se disipa más lentamente en ellos porque no tienen carga eléctrica. Tienen un alto poder de penetración (atraviesan el cuerpo humano) y pueden desplazarse grandes distancias.

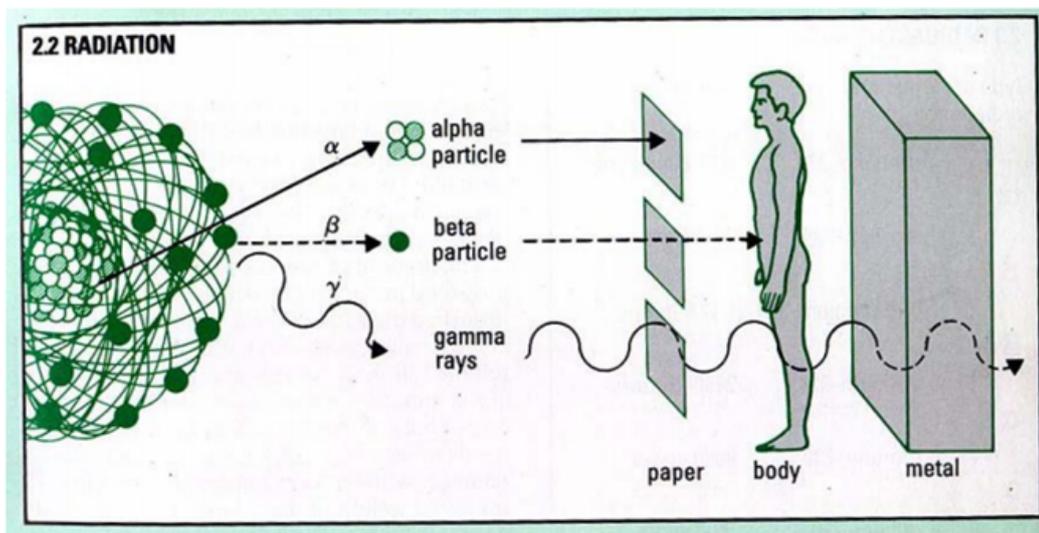


Figura 5. Penetración de las radiaciones (Venturi, 2010)

Efectos de la radiación ionizante

Debido a los efectos que las radiaciones pueden tener en los seres vivos, a continuación se hace una descripción de estos efectos para justificar la preocupación de la sociedad con respecto al tema de la radiactividad.

La actividad de un organismo vivo está determinada por sus células. Las radiaciones ionizantes pueden romper los enlaces entre los átomos dentro de las moléculas de las células vivas e incluso variar la naturaleza misma de los átomos. Dichos trastornos en las células pueden producir su muerte o un cambio en su funcionamiento. La radiación ionizante puede compararse con un transporte de energía que al interaccionar con la materia provoca peligrosos daños. En general, las células son suficientemente autosuficientes como para subsanar los daños aunque algunos de ellos pueden ser irreparables.

Las alteraciones causadas por la radiación pueden distribuirse en:

- a) Efectos **somáticos**: afectan directamente al sujeto que ha estado expuesto a la radiación.
- b) Efectos **hereditarios**: las secuelas se transfieren a sus descendientes.

Las radiaciones pueden ocasionar en las células vivas las siguientes consecuencias:

1. Matar la célula.
2. Perjudicar la reproducción de la célula.
3. Deteriorar las células de los ovarios o testículos provocando una anomalía hereditaria en la progenie.

En la mayoría de las ocasiones, la muerte de las células sólo es relevante cuando muere un gran número de ellas, ya que los órganos están formados de un número mayor del que necesitan para su actividad normal. Cuando las dosis tienen unos niveles muy altos entonces las alteraciones de las células se convierten en importantes.

Puede ocurrir que la célula dañada sobreviva a la radiación. En este caso las consecuencias de esta célula afectada pueden permanecer ocultas siempre y no manifestarse, ya que un pequeño número de células perjudicadas que no trabajan de un modo correcto no influirá en un órgano donde la mayoría tienen una conducta normal.

Sin embargo, la situación se complica cuando la célula dañada es una célula germinal dentro de los ovarios o testículos. La radiación ionizante puede perjudicar su ADN revelando una anomalía hereditaria en una o más generaciones.

Cuando una célula del tejido vivo varía provocando la replicación incontrolable de las células, estas tienen la capacidad de crecer más rápidamente en relación a las células adyacentes. Esto puede transformarse en un cáncer detectable y en ocasiones, producir la muerte por la difusión local o hacia otras partes del cuerpo.

1.6 MEDIDA DE RADIATIVIDAD

La radiactividad se expresa en una unidad llamada **becquerel** (Bq); 1Bq corresponde a una desintegración radiactiva por segundo. Pero también se puede expresar con otra unidad, el **curie** (Ci); 1Ci equivale a $3,7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$$

Por ejemplo, una muestra de Plutonio (^{239}Pu) con una cantidad de 2.000 Megabecquerel (MBq) emitirá una media de 2.000 millones de partículas alfa cada segundo.

La **dosis absorbida** es la medida de la radiactividad recibida por la materia. Su unidad de medida es el **gray** (Gy), que es la dosis de radiación que produce que un kilogramo de material absorba un julio de energía ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Los distintos tipos de radiación presentan diferentes niveles de energía y poderes de penetración, de modo que cada uno tiene distintos potenciales de riesgo.

Existe un peligro persistente con los rayos gamma, los rayos X y los neutrones ya que todos ellos pueden traspasar el cuerpo humano. Como las partículas alfa no atraviesan la piel no suponen una amenaza a distancia pero sí que conllevan un gran riesgo si se produce ingestión o inhalación. Las partículas beta pueden provocar incluso quemaduras en la piel así que se consideran también peligrosas.

Para poder comparar las distintas clases de radiación empleamos el **factor de calidad** (Q) que multiplicado por la “dosis recibida” nos da la **dosis equivalente**. La 18 unidad de la dosis equivalente es el **sievert** (Sv), 1 sievert de radiación alfa produce tanto daño como 1 sievert de radiación beta o gamma.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \times \text{Factor de Calidad}$$

Debido a que las diferentes partes del cuerpo son afectadas de manera distinta por la misma cantidad de radiación, existe un factor de ponderación para calcular el riesgo global para el organismo debido a exposiciones parciales.

La **Dosis Equivalente Efectiva** se calcula teniendo en cuenta las diferentes sensibilidades a la radiación de cada órgano del cuerpo. Es la suma ponderada de las dosis equivalentes para los órganos individuales y la irradiación total del cuerpo. Se mide también en sieverts.

1.7 VIDA MEDIA DE LOS RADIONUCLEIDOS Y CADENAS DE DESINTEGRACIÓN

Los radionucleidos no tienen todos la misma estabilidad, algunos decaen más rápidamente que otros. Cada radionucleido tiene una tasa de decaimiento propia, que lo diferencia del resto, y se denomina vida media. La vida media se puede definir como el tiempo necesario para que la actividad de una determinada cantidad de radionucleido se reduzca a la mitad.

Otra manera de definirlo sería diciendo que es el tiempo que tardan la mitad de los átomos de la muestra en alcanzar su estado estable. Las vidas medias de los radionucleidos varían desde fracciones de segundo a millones de años. La desintegración de un elemento inestable en la mayoría de los casos, genera un nuevo elemento que es también inestable y que transcurrido un periodo de tiempo relativamente largo, se desintegrará a su vez, originando otro elemento igualmente radiactivo.

Así sucesivamente hasta que una desintegración, la “última”, proporcione un elemento estable. En el caso de las sustancias radiactivas este último elemento siempre es el plomo. Todos los elementos resultado de desintegraciones sucesivas (hasta alcanzar el plomo) constituyen una familia radiactiva. En la naturaleza existen tres series o familias radiactivas: la del radio, la del actinio y la del torio.

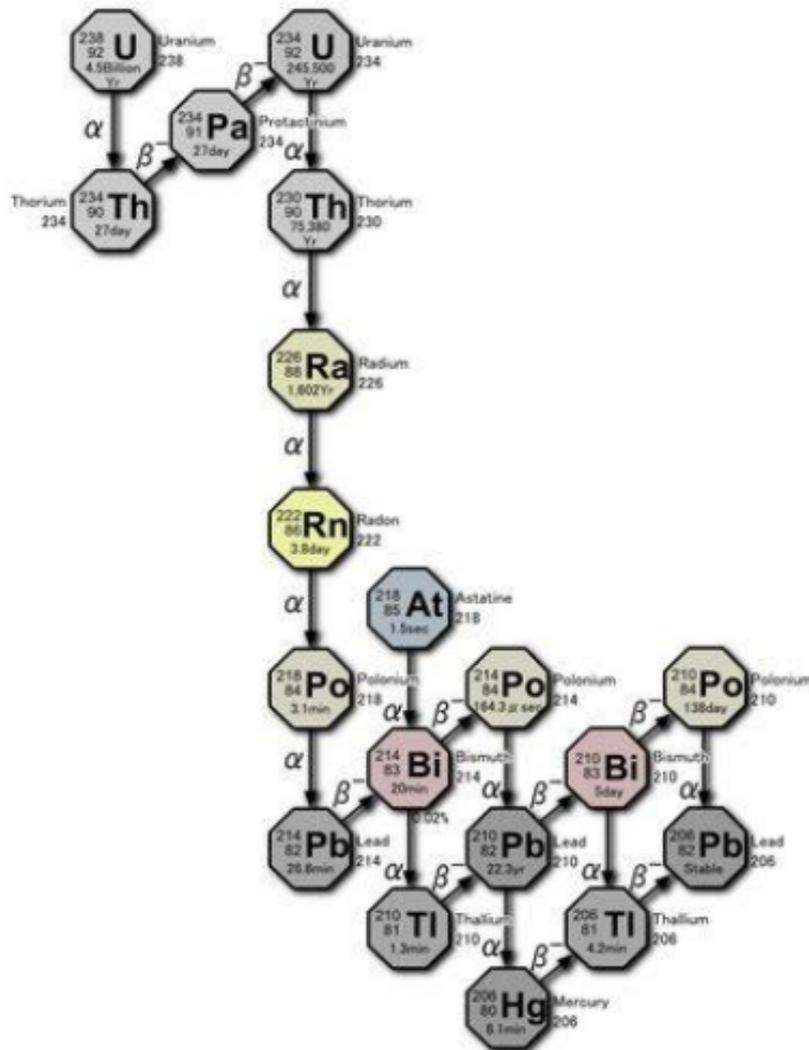


Figura 6. Cadena de desintegración del U^{238} (Garzón Ruipérez, 1979).

Las reacciones nucleares pueden modificar de manera artificial el núcleo de un elemento estable y lograr un isótopo radiactivo o un nuevo elemento inexistente en la naturaleza. Como se había comentado anteriormente, la radiactividad originada de esta forma es calificada como inducida o artificial.

La importancia de los radionucleidos en la producción industrial tiene que ver con dos aplicaciones, una es formar radioelementos con vidas medias distintas y otra, usar las cualidades radiactivas y químicas de diferentes elementos. Los isótopos de un mismo elemento, ya sean radiactivos o no, tienen el mismo comportamiento químico. Esta propiedad es empleada en procesos industriales y medicinales.

1.8 LEGISLACIÓN

España no tiene una legislación específica que regule el uso de los materiales de construcción en función de su radiactividad natural. Sin embargo, la Unión Europea dispone de una serie de preceptos destinados a regular el uso de dichos materiales, dependiendo de su dosis de radiactividad. Esta serie de principios constituyen lo que se conoce actualmente como Norma 112 de principios de protección radiológica concerniente a la radiactividad natural de materiales de construcción (Radiological Protection Principles concernig the Natural Radioactivity of Building Materials).

A continuación se recogen los puntos principales incluidos en la norma 112, resumidos en algunos trabajos previos (González-Neila, 2008; Manteca, 2011; Ferrero Vaquero, 2013). Estos trabajos exponen las ideas principales sobre la radiactividad natural en materiales de construcción y sus efectos, así como las dosis máximas recomendables en edificios de nueva y vieja construcción aplicables a países miembros de la Unión, en la cual se incluye España.

1) Todos los materiales de construcción contienen cantidades variables de nucleidos de elementos radiactivos naturales. Los materiales derivados de rocas, bien sean como placas, bloques o áridos, pueden contener cantidades importantes de radionucleidos naturales de las series del U y Th y del isótopo radiactivo del K.

2) La exposición a la radiación de los materiales de construcción puede ser dividida en exposición interna y externa. La exposición externa es causada directamente por la radiación γ . La exposición interna es causada por inhalación de Rn. El Rn es parte de la serie de desintegración del U, el cual está presente en muchos materiales de construcción. El Rn también puede acumularse en las partes inferiores de los edificios que están ubicados sobre terrenos con una composición determinada que incluya estos elementos.

3) Restringir el uso de ciertos materiales de construcción puede tener consecuencias económicas y sociales a nivel local y nacional. Dichas consecuencias, junto con los niveles nacionales de radiactividad natural de los materiales de construcción, deben ser asesoradas y consideradas estableciendo determinadas regulaciones.

4) El control en la radiactividad de los materiales de construcción puede estar basado en los siguientes criterios y principios radiológicos:

a) Los controles deben ser basados en criterios que son establecidos considerando las circunstancias nacionales. Dosis que superen 1mSv-1 deben ser aceptadas sólo en casos muy excepcionales donde los materiales fueron usados localmente. Es recomendable que los controles estén basados en una dosis en un rango de $0,3 - 1 \text{ mSv-1}$.

b) Nivel de exención. Los materiales de construcción deben estar exentos de todas las restricciones concernientes a su radiactividad si el

máximo de radiación gamma responsable de la dosis anual efectiva de una persona tiene un valor de 0,3 mSv. Este es el máximo de radiación gamma que es recibida en exteriores.

$$c) \text{ Criterio de dosis: } I = \frac{C_{ra}}{300 \text{ Bq/Kg}} + \frac{C_{th}}{200 \text{ Bq/Kg}} + \frac{C_k}{3000 \text{ Bq/Kg}}$$

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

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

Tabla 1. Límite de concentración de actividad en función del criterio de dosis y del uso del material (Norma112: Radiological Protection Principles concernig the Natural Radioactivity of Building Materials).

5) Normalmente, las medidas de la concentración de actividad son necesarias sólo en el caso donde hay una razón específica para sospechar que el criterio de dosis de los controles puede ser excedida. Los países miembros deben requerir, como mínimo, la medición de los tipos de materiales que son potencialmente sospechosos.

6) Las medidas de actividad de concentración en materiales de construcción deben ser realizadas con equipamiento apropiado cuya calibración haya sido aprobada y su calidad asegurada mediante programas reconocidos internacionalmente.

7) Algunos materiales de construcción naturales usados tradicionalmente contienen radionucleidos naturales donde la dosis anual de 1 mSv puede ser excedida debida a su alto índice de exhalación de Rn.

Algunos de estos materiales pueden haber sido usados durante décadas o siglos. En estos casos, el uso de estos materiales debe ser analizado y debe incluir costes financieros y sociales. Cabe destacar el punto 3 relacionado con la importancia de las consecuencias a nivel económico y social si se restringe el uso de ciertos materiales que en la actualidad son ampliamente usados en España para la construcción, tanto en interiores como en las fachadas exteriores de los edificios oficiales y particulares. Por ello, se hace necesaria una legislación que el análisis de aquellos materiales generalmente empleados y las posteriores medidas a tomar en relación con la dosis de radiación provocada por cada tipo de material.

2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área objeto de este trabajo se localiza en las canteras en la zona noreste de la localidad de Villavieja de Yeltes, en la parte Suroeste de la provincia de Salamanca (Fig. 7). Estas canteras se sitúan a ambos lados de la carretera SA-321 (Fig.8) correspondiente a la hoja 3-5 del mapa de Cartografía Militar de España (Escala 1:100000).

Figura 7. Localización de Salamanca en mapa de España.

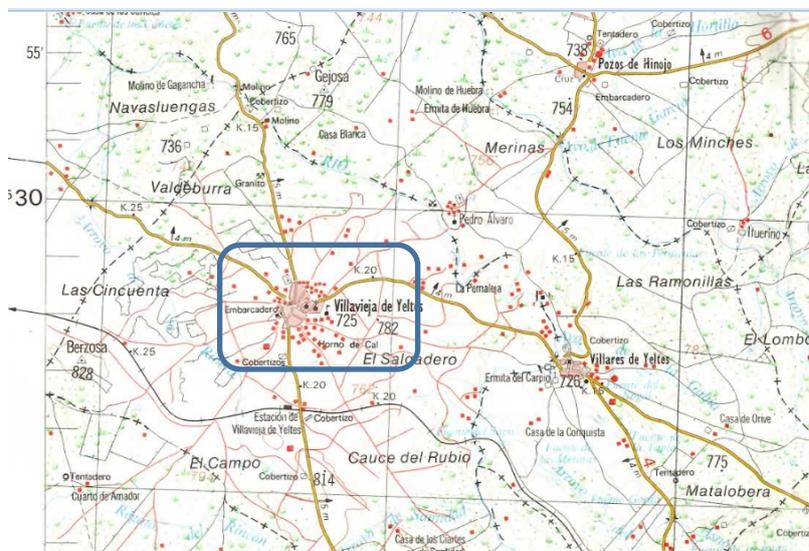


Figura 8. Localización de Villavieja de Yeltes (Mapa Cartografía Militar de España)

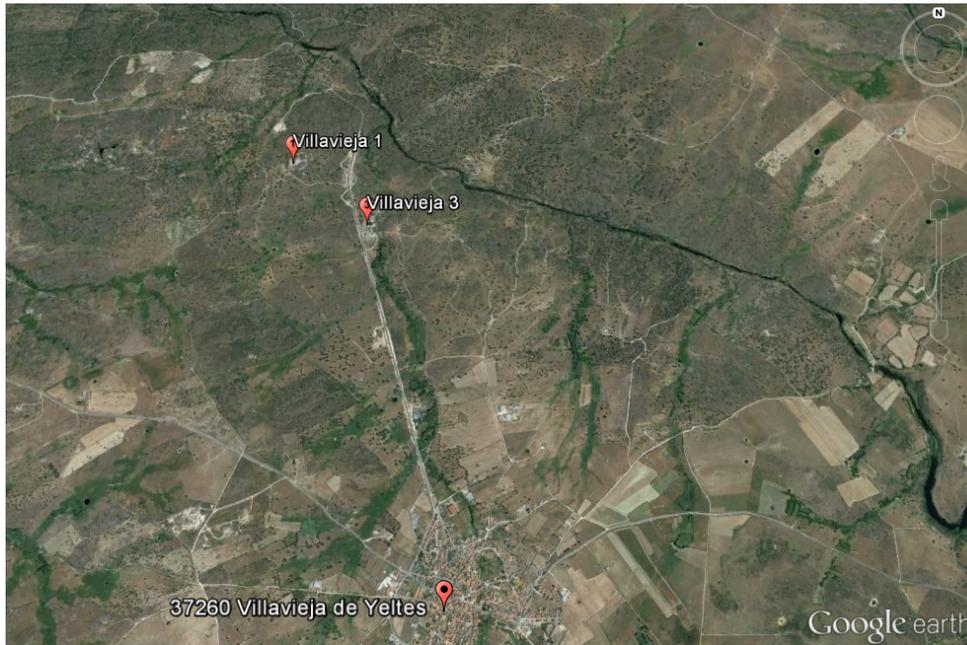


Figura 10. Zonas de extracción de muestras (Imagen Google Earth).

Por su situación, altitud y configuración topográfica, la climatología de la región podemos definirla como de tipo continental, con veranos cortos, no demasiado calurosos (temperaturas medias en agosto de 20°C), inviernos largos, fríos y una generalizada escasez de lluvias. La pluviometría oscila entre los 600 mm a los 700 anuales, repartidos irregularmente, tanto respecto a la orografía como a las estaciones del año. Estas lluvias, que local y temporalmente pueden ser intensas, condicionan la escorrentía. (Mapa hidrogeológico de Castilla y León, 2012)

3. MARCO GEOLÓGICO

A continuación se hace una descripción resumida de la Geología de la zona de estudio por su interés en cuanto a la localización de los granitos estudiados como por el interés asociado a las actividades que actualmente se desarrollan en la zona en relación a la prospección de uranio.

Geológicamente, la provincia de Salamanca se sitúa en dos unidades estructurales fundamentales: La zona Centroibérica del Macizo Hespérico, según la clasificación de Julivert et al (1974) y la Zona de la Cuenca del Duero (Mapa geológico y minero de España, 1996). La Zona Centro ibérica se vio afectada por dos importantes orogenias: la Orogenia Hercínica y la Orogenia Alpina.

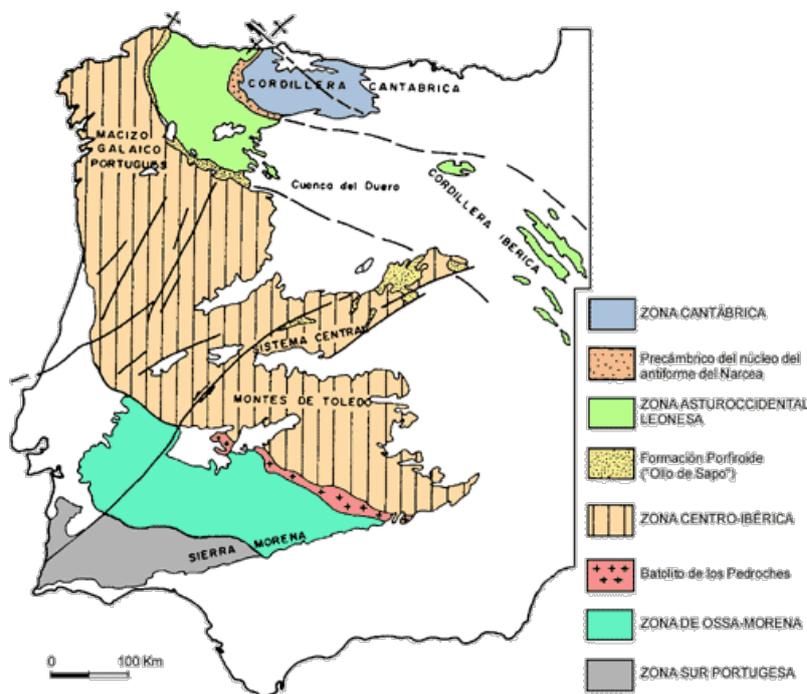


Figura 11. División del Macizo Ibérico según Julivert et al. (1972).

Desde el punto de vista estructural, la Zona Centroibérica se divide en dos dominios formados durante la primera fase Hercínica: El dominio de Pliegues Verticales y el Dominio de Pliegues Acostados (Mapa Geológico y Minero de Castilla y León)

La Orogenia Hercínica afectó a los materiales véndico-cámbricos y ordovícicos, por medio de una deformación polifásica, existiendo tres fases principales de deformación, más una fase tardihercínica; a esta orogenia se le han asociado

además procesos de metamorfismo y plutonismo (Mapa Geológico de España, 1996).

Las estructuras formadas son principalmente pliegues con foliación asociada y cabalgamientos, pero también aparecen zonas de cizallas extensionales y transcurrentes.

La primera fase Hercínica, se caracteriza por ser una fase compresiva relacionada con un acortamiento, dando lugar a un plegamiento de los materiales precámbricos y paleozoicos. Junto con el engrosamiento cortical de esta fase, se produce un metamorfismo progrado de presión intermedia.

La segunda fase Hercínica, en algunos casos se caracteriza por la continuación de la deformación compresiva de la anterior fase. Las estructuras que se general son cabalgamientos dúctiles y pliegues aplastados.

En cuanto al metamorfismo, en un principio de grado medio a medio-alto, y posteriormente se presenta un cambio a unas condiciones de menor presión, que posiblemente pudo ser de carácter isotérmico.

La tercera fase Hercínica, se trata de una nueva etapa compresiva relacionada con un acortamiento, que da lugar a un plegamiento y a un cizallamiento que afecta a las fases anteriores. Durante la tercera fase se da una esquistosidad (S3), que provoca la crenulación de la anterior.

La parte de la provincia de Salamanca que aparece en la hoja 476 (Figura 13) se encuentra dentro del Dominio de Pliegues Verticales. Los materiales que encontramos son fundamentalmente metasedimentos afectados por la Orogenia Varisca y rocas ígneas relacionadas con ella. Aparecen pliegues de dirección NO-SE con un plano axial subvertical con una esquistosidad (S1) asociada, debidas todas las estructuras a la deformación (D1). Observamos en los materiales cartografiados en la hoja de Salamanca, como la intensidad del cizallamiento aumenta en las zonas más profundas dando pliegues apretados, asimétricos y con charnelas curvas. Junto con los pliegues generados por la cizalla dúctil, aparece asociada una esquistosidad S2.

En los materiales que aparecen en la Hoja de Villavieja de Yeltes vemos como por el desarrollo de esta fase se producen pliegues de todo orden. Las isogradas del metamorfismo progrado que se da en la zona son afectadas por las macroestructuras de esta fase. Además, se reconocen frecuentemente fallas y zonas de cizallas subverticales que pasan posteriormente a subhorizontales, de forma que son coherentes con el acortamiento sufrido en la región.

La fase tardihercínica, se caracteriza por la existencia de una fracturación general, observándose la presencia de una familia de fallas de dirección NE-SO. Durante esta etapa, algunas estructuras rejuegan con cizallas subverticales o fallas normales, formándose de esta manera nuevos sistemas conjugados de cizallas. También se dan fallas y pliegues muy abiertos con diversas direcciones. Esta fase está muy poco desarrollada en la hoja de Villavieja de Yeltes.

La Orogenia Alpina, se caracteriza por una tectónica frágil, que a escala regional da una serie de fracturas con una componente de movimiento horizontal. La actividad de estos rejuegos mesozoicos y alpinos, además afectó al registro sedimentario cenozoico. La actividad, durante este periodo generó algunos indicios indirectos como son lineaciones y alguna anomalía geográfica o geológica.

La cuenca del Duero es una importante depresión de aproximadamente 50000 km² generada por el hundimiento del Macizo Hespérico, y que se ha rellenado por sedimentos continentales de edad terciaria y de una gran variedad litológica.

Es una cuenca intraplaca asimétrica de evolución compleja, con espesores que varían entre 400 metros en la zona sur y oeste a unos 3000 metros en el norte y este, junto con la primera fase compresiva de la Orogenia Alpina, siguiendo las directrices tardihercínicas.

El origen y evolución de la cuenca y de sus satélites periféricas se debe a diversos factores que han concurrido en ella, como el contexto estructural, las últimas etapas compresivas, el diferente tectonismo de los bordes, la variedad litológica y finalmente por la evolución paleoclimática.

La cuenca del Duero se ha formado por el transcurso de diferentes etapas geológicas:

La primera fase se originó a finales del cretácico, en la que se dan diferentes procesos de sedimentación de distintas litologías.

La segunda fase producida en el Eoceno Medio, comienza con un importante relleno sedimentario de diversas litologías.

La tercera fase de relleno, sucede con la última ruptura, en el periodo del Mioceno inferior- Plioceno.

La cuarta y última fase, va desde el Plioceno hasta la actualidad, produciéndose un vaciado de los materiales terciarios que serán sustituidos por los cuaternarios, dando lugar a la apertura de la cuenca hacia el Atlántico.

Todos los procesos evolutivos han quedado reflejados en la geología de la provincia de Salamanca.

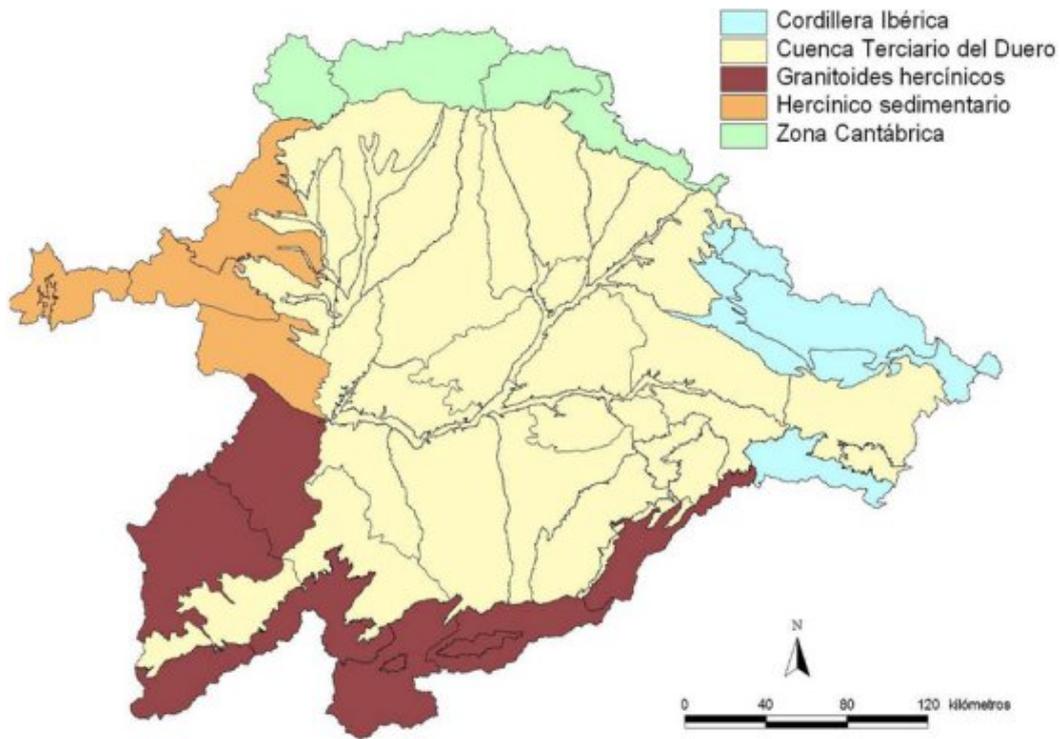


Figura 12. Esquema geológico de la cuenca del Duero (Confederación Hidrográfica del Duero).

La zona de estudio aparece en la hoja 476 del mapa geológico del IGME (Fig. 13).

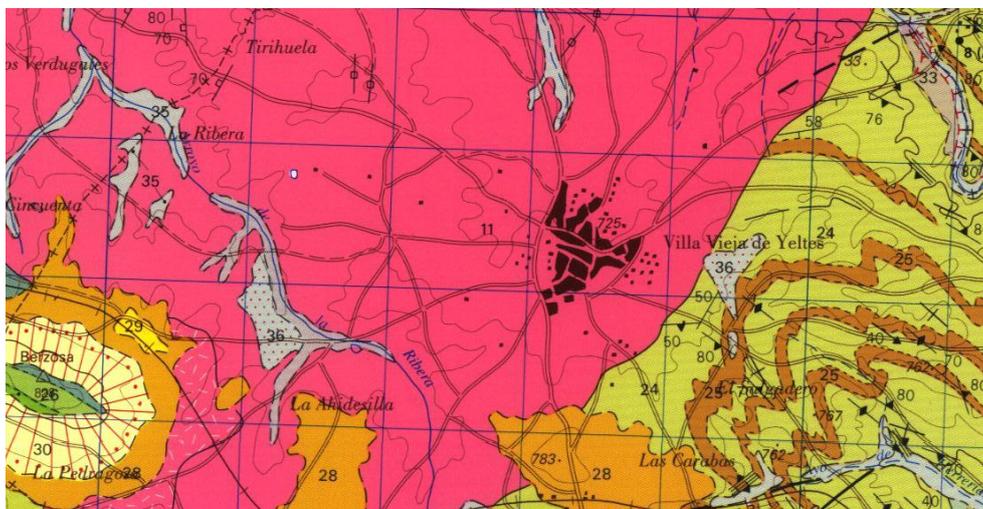


Figura 13. Mapa geológico de la zona de estudio (Mapa Geológico de España 1996).

El granito aflora en grandes bolos de dimensiones métricas y con forma redondeada. Presenta una facies de borde, en el contacto N y O del macizo, caracterizada por tener un tamaño de grano un poco menor que la facies normal, y por ser un poco más rica en biotita.

El plutón de Villavieja ha originado un metamorfismo de contacto sobre los materiales del Complejo Esquisto Grauváquico. Las cordieritas formadas durante el metamorfismo de contacto definen una lineación dominante paralela a los pliegues N-S de plano axial vertical, desarrollados durante la cuarta fase varisca (*Carnicero et al., 1987*). El granito presenta una foliación marcada principalmente por los feldespatos variando las direcciones de N-S 20°. Se han observado algunos enclaves, biotíticos, metamórficos, migmatíticos y microgranudos, todos ellos de pequeño tamaño.

4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 TRABAJO DE CAMPO

Para poder realizar este trabajo de investigación, se han tomado muestras en dos frentes diferentes del granito de Villavieja de Yeltes (Fig.14 y Fig.15)

Estas muestras se han cogido en las canteras que se sitúan a ambos lados de la carretera SA-321—Las muestras con un determinado acabado fueron suministradas por la empresa de cantería de la localidad.



Figura 14. Frente de cantera donde se obtuvo "Villavieja 1".



Figura 15. Segundo frente de cantera donde se obtuvo la muestra "Villavieja 3".

Los dos frentes tienen claras diferencias, sobre todo en cuanto a homogeneidad. La empresa Minas y Geología aportó información acerca de la explotación que se está llevando a cabo en las canteras de dicho granito.

Las muestras se recogieron en el mes de Febrero, se almacenaron en bolsas de cantidad aproximadamente de un 1kg y fueron embaladas y numeradas correctamente.

4.2 TRABAJO DE LABORATORIO

• Molienda

Las muestras fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño de grano en la máquina de molienda (Fig.16) y posteriormente fueron sometidas a un segundo proceso de disminución de tamaño mediante la utilización de un molino de aros excéntricos (Fig.17)



Figura 16. Molienda de muestras.



Figura 17. Disminución de tamaño de grano, en recipiente de aros excéntricos.

- **Laboratorio de análisis químico**

Las muestras molidas (Fig.18) se entregaron en recipientes cerrados al laboratorio de la USAL de análisis químico, donde se analizó la composición mediante ICP-OES y mediante ICP-MS.



Figura 18. Muestras molidas y envasadas en recipientes.

Para la determinación de elementos mayores y traza se ha realizado un ataque en medio ácido (NO_3H y FH), bajo presión en un digestor de microondas modelo *Ethos Sel de Milestone*. La disolución obtenida fue tamponada con ácido bórico.

Los elementos mayores han sido determinados con un espectrómetro de emisión en Plasma ICP-OES modelo Ultima 2 de JOBIN YVON. Es una técnica de análisis multi-elemental que utiliza una fuente de plasma de acoplamiento inductivo para disociar átomos o iones que constituyen la muestra, excitándolos a un nivel donde emiten luz de una longitud de onda característica. Un detector mide la intensidad de la luz emitida y calcula la concentración de ese elemento.

Los elementos traza se determinan unos mediante ICP-OES y otros mediante ICP-MS modelo ELAN 6000 de la casa PERKIN-ELMER. Esta técnica es capaz de determinar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica en un rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud. La muestra líquida es vaporizada e ionizada gracias a un plasma de Ar. Los iones una vez formados pasan al espectrómetro de masas donde son separados mediante un analizador y detectados.

Elementos mayores	ppm
Si	0.05
Al	0.06
Fe	0.04
Mn	0.005
Mg	0.13
Ca	0.06
Na	0.13
K	0.11
Ti	0.07
P	0.14

Tabla 2: Límites de detección para los elementos mayores, estudiados mediante ICP-OES.

Elementos traza	ppm
Ba	0.05
Co	0.06
Cr	0.05
Cu	0.08
Li	0.25
Nb	0.11
Ni	0.05
S	0.05
Sr	0.11
Zn	0.05

Tabla 3: Límites de detección para los elementos traza, Ba, Cu, Li, S, Sr, Zn, analizados mediante ICP-OES y Co, Cr, Ni, Nb, Rb analizados mediante ICP-MS.

Elemento	Límite de detección
K (%)	0.1
U (ppm)	0.5
Th (ppm)	0.5

Tabla 4: Límites de detección para los elementos radiogénicos estudiados.

- **Ensayo de exhalación de radón en aire.**

Otra porción de las muestras tanto molidas como no molidas fue enviada al laboratorio de radiactividad natural de la Universidad de Coimbra, donde se realizaron una serie ensayos de laboratorio para determinar las tasas de exhalación de radón esta roca,

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

Una vez secas las muestras fueron introducidas en unos recipientes metálicos junto con una cierta cantidad de gel de sílice para controlar la humedad. Los recipientes metálicos tienen una capacidad de 5 litros y están homologados para el uso o transporte de sustancias peligrosas.

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

Las muestras permanecen en los contenedores durante un período mínimo de 21 días para que se establezca el Ra contenido en la muestra con el Rn contenido en el aire (Fig.19).



Figura 19. Contenedores

Una vez transcurridos 21 días, se conectaron las válvulas de los contenedores al detector de Rn. Para medir la concentración de gas Rn se usó un equipo con cámara de ionización Alphaguard 2000 Pro, con calibración certificada. La determinación de la concentración de Rn fue efectuada a partir del procedimiento establecido por el fabricante del equipo (*Gonçalves et al (2006)*) (Fig.20).



Figura 20. Medición de cada contenedor con el equipo Alphaguard 2000 Pro.

El gas producido dentro del contenedor fue extraído con ayuda de una bomba con un caudal controlado de 1 l/min. y conducido a través de un circuito apropiado hasta la cámara de ionización donde fue medida su concentración. Dicha cámara está conectada a un ordenador donde se registra las medidas tomadas en intervalos de tiempos de 10 minutos. Los 10 primeros minutos son para que se establezca la medida y una vez estabilizada medimos la media de cada período, con una duración total de cada ensayo de aproximadamente dos horas para cada muestra.

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

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

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

Cf : Concentración de gas Rn medida al final del periodo de acumulación (Bq/m³)

V : Volumen del contenedor (m³)

W : Peso de la muestra (Kg)

λ : Constante de desintegración del Rn (hr⁻¹) = 0.00755hr⁻¹

4.3 TRABAJO DE GABINETE

El trabajo de gabinete consistió en la búsqueda bibliográfica, para situar el granito de Villavieja en un contexto geológico y los datos sobre radiactividad natural que pudiera haber sobre la zona. Hay que mencionar que el granito de Villavieja se localiza en una zona de gran potencial minero en cuanto a la extracción de uranio. De hecho, la empresa australiana Berkeley tiene establecidas sus instalaciones en la zona de Retortillo, que está a unos 12 km de la zona de trabajo. Esto tiene importancia económica, pero también social, como veremos más adelante.

Los resultados obtenidos en los laboratorios analíticos se introdujeron en una hoja excel y a partir de ellos se hicieron diversas gráficas y correlaciones.

5. RESULTADOS

5.1 ANALISIS QUÍMICO

En el Servicio de Análisis Químico de la Universidad de Salamanca se ha analizado la presencia de los siguientes elementos en las muestras situadas en las canteras de la localidad de Villavieja de Yeltes:

- Elementos mayores: analizados mediante ICP-OES. El grado de humedad se ha medido como pérdidas al fuego, y se expresa como material volátil (M.V.).

Muestras	ppm	
	Villavieja 1	Villavieja 3
Al ₂ O ₃	13.72	13.83
CaO	0.6	0.64
Fe ₂ O ₃	1.21	1.43
K ₂ O	4.57	4.54
MgO	0.28	0.32
MnO	0.03	0.03
Na ₂ O	3.89	3.51
P ₂ O ₅	0.29	0.31
SiO ₂	73.57	72.48
TiO ₂	0.21	0.21
Mat.Volátil	0.89	0.81

Tabla 5: Resultados obtenidos del análisis químico.

- Elementos traza: Ba, Cu, Li, S, Sr, Zn, analizados mediante ICP-OES y Co, Cr, Ni, U, Th, Nb, Rb, analizados mediante ICP-MS.

Elementos traza	ppm	ppm
	Villavieja 1	Villavieja 3
Ba	182	188
Cu	*	*
Li	190	200
S	*	*
Sr	74	107
Zn	29	63
Co	*	*
Cr	48	70
Ni	2	2
U	7	11
Th	12	13
Nb	9	12
Rb	280	291

*Elementos no detectados

Tabla 6: Resultados obtenidos del análisis químico para los elementos traza.

- Elementos radiogénicos: U, Th, K₂O

Elemento	Villavieja 1	Villavieja 3
K ₂ O (%)	4.8	5.25
U (ppm)	9.5	12.2
Th (ppm)	8	8.8

Tabla 7: Resultados obtenidos del análisis químico para los elementos radiogénicos.

En primer lugar, se realizará una descripción de los diferentes elementos encontrados, tanto mayores como traza, en la que estudiaremos las diferencias encontradas en las diferentes muestras.

Al final de cada apartado se incluye un resumen con los puntos más relevantes.

Esta descripción de resultados nos llevara a unas conclusiones finales donde se interpretaran los datos obtenidos.

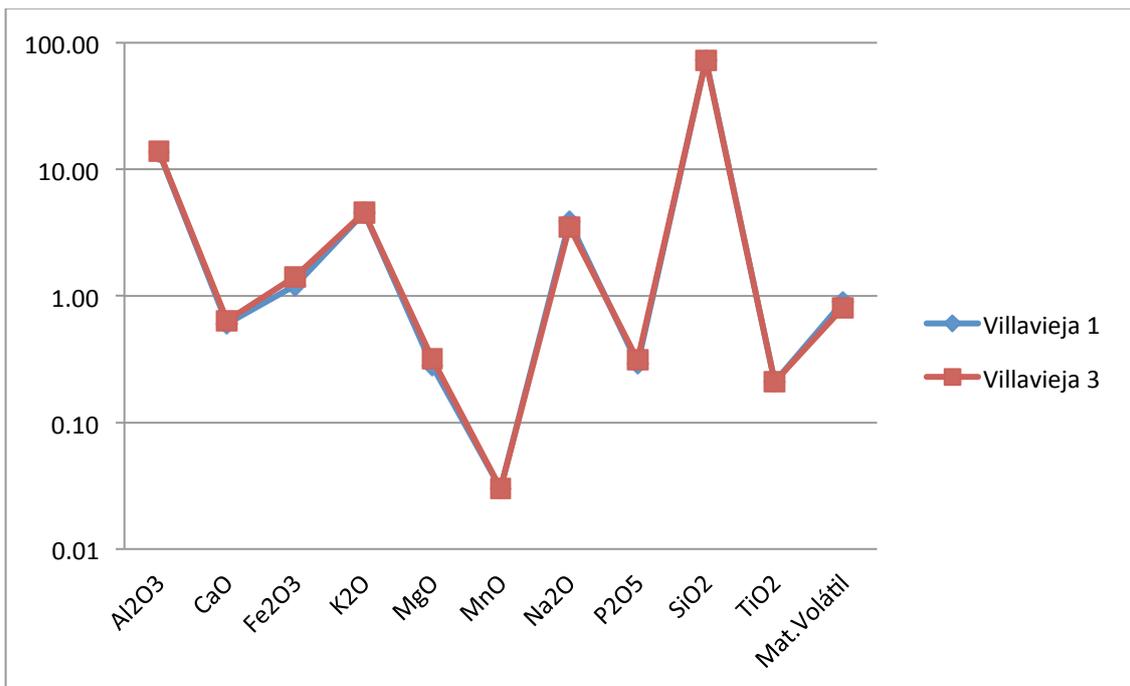


Figura 21. Comparación de las concentraciones de elementos mayores en las dos muestras estudiadas.

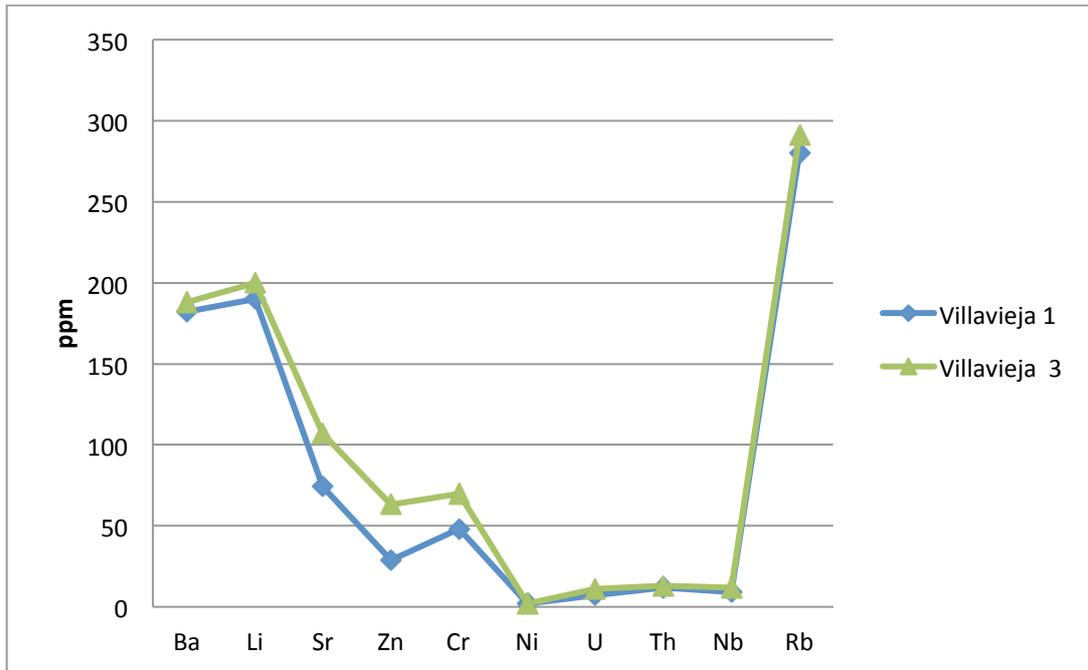


Figura 22. Comparación de los elementos traza de las dos muestras estudiadas.

En los resultados obtenidos del análisis químico realizado, los granitos se comportan de manera esperada, con un contenido elevado en los elementos radiogénicos, con el Th en un rango de 10-13 ppm, y el uranio comprendido entre 7-11 ppm.

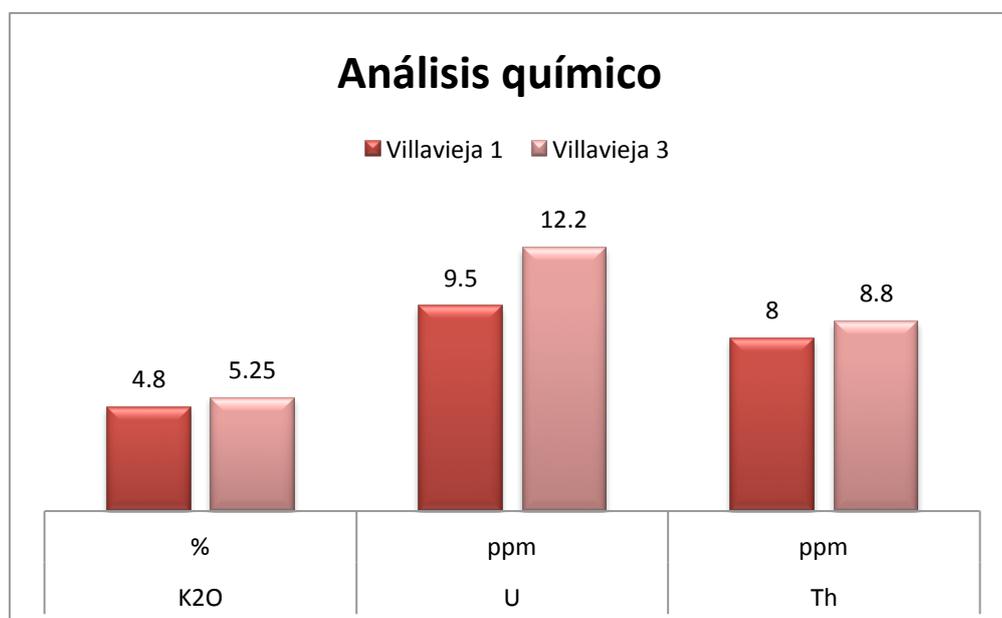


Figura 23. Resultados comparativos de análisis químico de elementos radiogénicos para las dos muestras estudiadas.

5.2 EXHALACIÓN DE RADÓN AL AIRE

Para la realización de este ensayo se utilizaron las muestras del granito de Villavieja de 1Kg. Una vez reducidas las muestras de rocas a un tamaño inferior a 4 mm, se colocaron en unos contenedores impermeables al radón donde se almacenaron durante más de 21 días hasta asegurar el equilibrio radiogénico. Transcurrido este período se conectó el contenedor a un detector de Rn donde se realizó la medida de la concentración de Rn en el interior del contenedor (Tabla 8).

MUESTRA	EXHALACIÓN			
	MASA		ÁREA	
	[Bq.kg.h-1]	[Bq.kg.s-1]	[Bq.m2.h-1]	[Bq.m2.s-1]
Villavieja 1	0.066	1.86E-05	3.71	1.04E-03
Villavieja 3	0.112	3.13E-05	6	1.68E-03
Villavieja 3 (Molida)	0.108	3.01E-05	13.27	3.71E-03

Tabla 8: Resultados de los análisis de concentración de Rn.

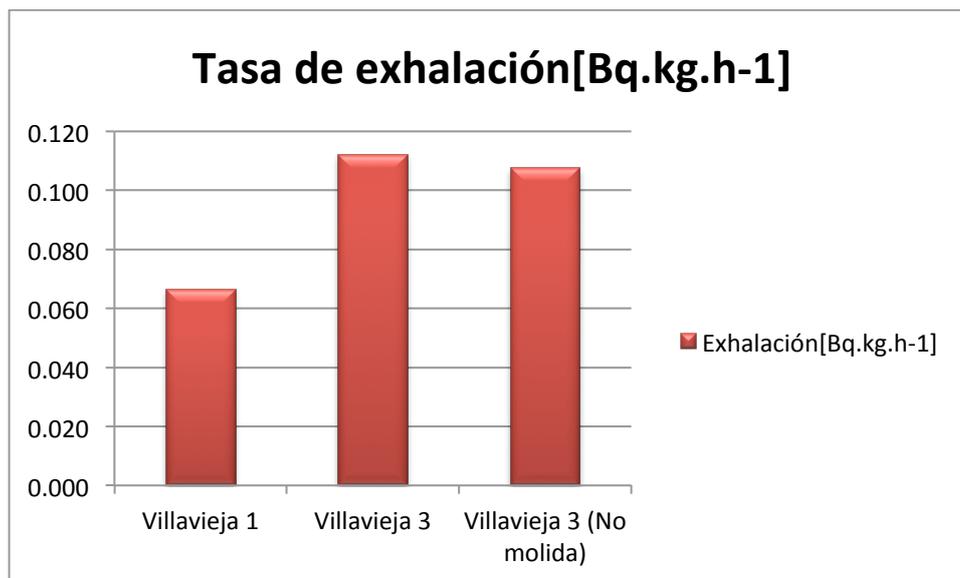


Figura 24. Tasa de exhalación de Rn.

Los valores de concentración de Rn en muestras molidas se encuentran entre 0,066 y 0,112 Bq.kg.h-1. Si la muestra no está molida el valor disminuye, como podemos observar en "Villavieja 3".

Los valores obtenidos para el granito de Villavieja son comparables con los de otros granitos que actualmente se utilizan en construcción en Salamanca, como es el caso del granito de los Santos (Manteca, 2011).

5.3 ANÁLISIS MINERALÓGICO

El estudio petrográfico fue realizado en el laboratorio de microscopía del Área de Petrología y Geoquímica de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca.

Para el estudio de nuestras rocas utilizamos láminas delgadas de las muestras recogidas. Las observaciones son las siguientes:

Los minerales de mayor tamaño observados son cuarzo y feldespatos potásicos, muchos de ellos fracturados y deformados (Figura 25)

Constituyen los minerales principales, junto con la biotita.

También se aprecia una gran cantidad de circones en el interior de las biotitas formando un halo metamórfico. (Fig.26)

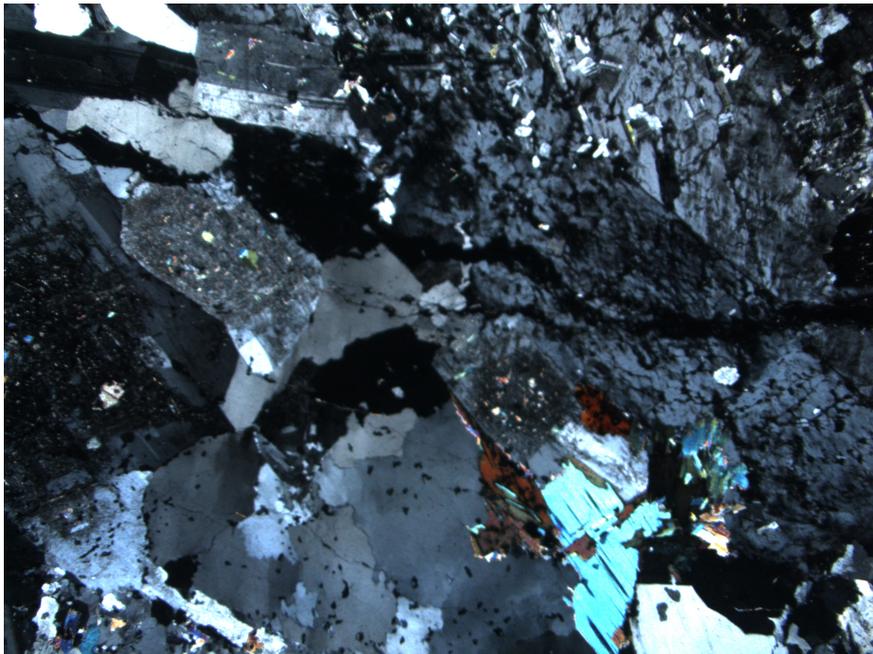


Figura 25. Fractura en granito de Villavieja de Yeltes en Nicoles Cruzados. Objetivo 2.5. Fotografía: Sonia Fuentes Seisdedos.

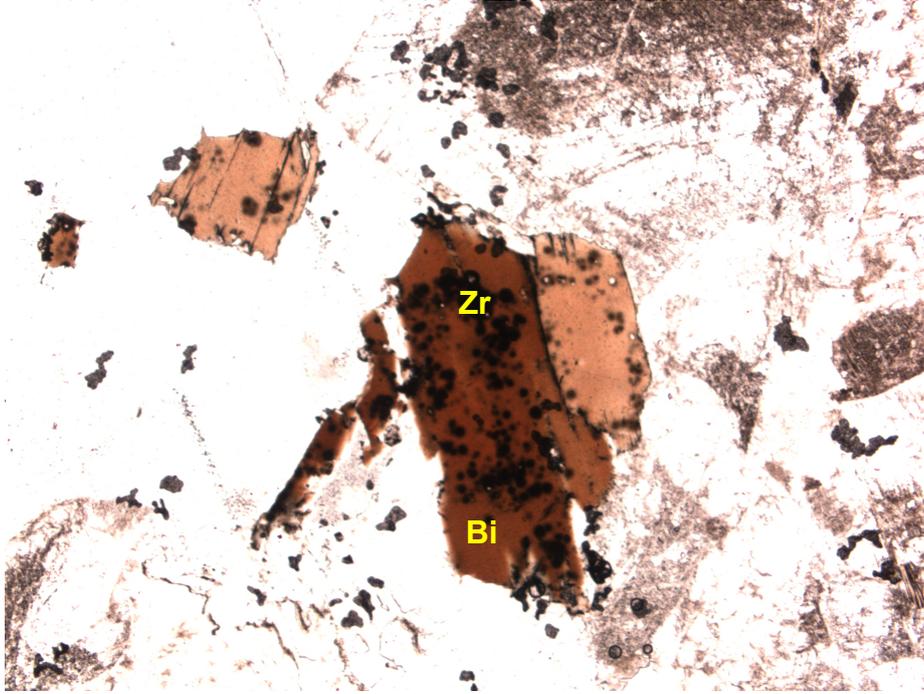


Figura 26. Circones en el interior de las biotitas en Nicos Paralelos con objetivo 2.5. Bi=Biotita y Zr=Circón. Fotografía: Sonia Fuentes Seisdedos.

6. CONCLUSIONES

El estudio del granito de Villavieja nos ofrece un aspecto novedoso con respecto a la potencial radiactividad natural asociada al mismo.

A pesar de los aspectos mesoscópicos diferentes del granito de Villavieja en ambos frentes de explotación que aparecen en la zona, la mineralogía y geoquímica de las muestras obtenidas son similares.

Aunque existen algunas diferencias de concentración de elementos de interés para este trabajo, por ejemplo: Uranio en la muestra "Villavieja 1" es 9.5 ppm y en la muestra "Villavieja 3" es 12.2 ppm, se puede considerar que las diferencias con respecto a los valores radiológicos no son significativas.

A pesar de que el contenido de U se asocia al contenido en minerales accesorios como el circón y que en las muestras estudiadas se ha observado una gran concentración de este mineral, la concentración de U está dentro de los límites admitidos para este tipo de roca. Dado que la roca emitirá más o menos gas Rn en función de que la roca esté más o menos alterada o que el mineral esté más o menos fracturado, se puede concluir que el granito de Villavieja está poco afectado por fenómenos de meteorización, alteración química o fracturación que haya afectado a los minerales accesorios. Esto promueve que la exhalación de Rn se mantenga en mínimos.

Aunque los valores de exhalación de Rn son admisibles para este tipo de roca, a raíz de este trabajo y otros que están llevándose a cabo en este momento se propone que se hagan extensibles los ensayos de la exhalación en función del tipo de acabado. Esto podría ser un valor añadido a la hora de comercializar este granito, pues el uso en interiores requiere una tasa de exhalación más baja y es posible que algún tipo de acabado, como por el ejemplo el pulido, haga que la exhalación disminuya aún más en piezas trabajadas.

En términos sociales, será interesante divulgar estos resultados a la población afectada por vivir en las inmediaciones de las canteras, evitando así futuros problemas con la comercialización de este granito, ya que queda demostrado que su afloramiento en la zona no provoca ningún máximo en la exhalación de Rn, producto de consecuencias negativas en la salud humana cuando se superan determinados valores.

7. BIBLIOGRAFÍA

ATLAS DE ROCAS ÍGNEAS. Departamento de Petrología y geoquímica (Universidad Complutense de Madrid).

Carnicero Gómez-Rodulfo, A., López Plaza, M. y Delgado, J.C. (1987): *ESTUDIO PETROLÓGICO DEL GRANITO DE VILLAVIEJA DE YELTES-SALAMANCA*. Mem. Mus. Labor. Miner. Geol. Facultad de Ciencias.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL DUERO. Consultada 5 de Mayo, 2015. <http://www.chduero.es/Default.aspx?TabId=86>

Ferrero Vaquero, A. (2013): *CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA DE LA EPISIENITA "ROJO SAYAGO"*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Salamanca. Facultad de Ciencias.

Frenzel, Louis L. (2003): *SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE COMUNICACIONES*. Traducción de Principles of Electronic Communication Systems, The McGraw-Hill Companies. Ed Alfabuara. Mexico

Garzón Ruipérez, I. (1979): *RADIOACTIVIDAD Y MEDIO AMBIENTE*. Universidad de Oviedo. Servicio PUBL.

GEOLOGÍA, RASGOS FUNDAMENTALES: ZONIFICACIÓN DEL MACIZO HESPÉRICO SEGÚN JULIVERT ET AL (1972). Consultada 5 de Mayo, 2015. <http://contenidos.educarex.es/mci/2004/21/materiales/geo/geologia1.htm>,

González Neila, C. (2008): *RADIOACTIVIDAD NATURAL EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Salamanca. Facultad de Ciencias.

Guerrero, S., Llorente, M. (2002): *VARIABILIDAD PETROGRÁFICA Y GEOQUÍMICA DE LOS GRANITOIDES DEL SW DE SALAMANCA*. Universidad de Salamanca.

Higgy, R.H., Tahawy, M.S., Abdel Fattah, A.T., Akabawy, U.A. (2000): *RADIONUCLEIDE CONTENT OF BUILDING MATERIALS AND ASSOCIATED GAMMA DOSE RATES IN EGYPTIAN DWELLINGS*. J. Environ. Radioactivity 50, 253 – 261.

Jorba Bisbal, J., Ortega Aramburu, X. (2010): *RADIACIONES IONIZANTES: UTILIZACIÓN Y RIESGOS*. Colección E-POLITEXT, 56. Ediciones UPC, S.L. Barcelona, España.

Julivert, M., Fontbote, J., Ribeiro, A., & Conde, L. (1972): *MAPA TECTÓNICO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y BALEARES*. Escala 1:1.000.000. Ins. Geol. Min. España. Madrid.

Manteca Alvarez, M. (2011): *CARACTERIZACIÓN RADIOLÓGICA DE LAS ROCAS ORNAMENTALES DE CASTILLA Y LEÓN*. Proyecto Fin de Carrera. Universidad de Salamanca. Facultad de Ciencias.

MAPA GEOLÓGICO DE ESPAÑA (1996): Escala 1:50000, nº476 (Salamanca). IGME, Madrid

MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y ENERGÍA. Consultada 11 de Agosto de 2015.
<http://www.minetur.gob.es/energia/nuclear/Instalaciones/Paginas/instalacionesRadiactivas.aspx>

PIEDRA NATURAL. Consultada 21 de Abril, 2015.
<http://www.piedra.com/acabados.shtml>

Quindós Poncela, L. S (1995): *RN UN GAS RADIATIVO DE ORIGEN NATURAL EN TU CASA*. Consejo de seguridad nuclear. Universidad de Cantabria. DL SA. 495-1995, ISBN 84-8102-114-8, Imprenta Juventud.

Tejado Ramos, J. J. (2014): *ANÁLISIS DE LA EXTRACCIÓN Y TRASFORMACIÓN DE GRANITOS COMO ACTIVIDAD NORM.* Diseño de Protocolo. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. Física Aplicada.

Venturi, M. (2010): *VIVERE E CONVIVERE CON LE RADIAZIONI.* COSMOPOLIS, rivista semestrale di cultura - CODICE ISSN: 1828-9231 (<http://www.cosmopolis.globalist.it/>)