

Atómica y radiactiva: una situación de aprendizaje en torno a la radiactividad, sus aplicaciones y controversias

Eva María Terrado Sieso 

Departamento de Didácticas Específicas (Área Ciencias Experimentales). Facultad de Educación. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. eterrado@unizar.es

Esther Cascarosa Salillas 

Departamento de Didácticas Específicas (Área Ciencias Experimentales). Facultad de Educación. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. ecascano@unizar.es

Jorge Pozuelo Muñoz 

Departamento de Didácticas Específicas (Área Ciencias Experimentales). Facultad de Educación. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. jpozuelo@unizar.es

Fernando García Sánchez 

IES Medina Albaida. Zaragoza, España. fernandogarcia6c@gmail.com

[Recibido: 16 febrero 2024, Revisado: 12 junio 2024, Aceptado: 3 julio 2024]

Resumen: La LOMLOE ha supuesto una nueva reforma curricular de las enseñanzas obligatorias en España cuyas modificaciones más remarcables son un enfoque plenamente competencial y la necesidad de trabajar con situaciones de aprendizajes (SdA) como escenarios de trabajo en el aula para ir construyendo progresivamente, y desde las distintas materias, el perfil de salida del alumnado al finalizar cada etapa educativa. Este trabajo tiene como propósito principal contribuir desde la didáctica de las ciencias experimentales a orientar al profesorado de Física y Química en el diseño de dichas SdA y poner en valor las metodologías más adecuadas para enseñar y aprender ciencias. Para ello, desde un diseño de estudio de caso, se ha sistematizado la integración de los elementos curriculares en la construcción de una SdA y se ha descrito paso a paso su aplicación con un ejemplo contextualizado y justificado curricularmente en torno a la radiactividad, sus aplicaciones y controversias. A partir de su implementación parcial en un escenario real con 66 estudiantes de 3º ESO durante el curso 2022-23, se ha podido concluir, además, su contribución a la alfabetización científica del alumnado participante.

Palabras clave: Alfabetización científica; Prácticas científicas; Historia de la Ciencia; Controversia socio-científica; Física y Química.

Atomic and Radioactive: a learning situation on radioactivity, its applications, and controversies

Abstract: The LOMLOE has brought about a new curricular reform in compulsory education in Spain, emphasizing a fully competency-based approach and the imperative to engage in learning situations (SdA) as classroom work scenarios. The gradual construction of students' profiles at the end of each educational stage is a notable outcome. This research aims to significantly contribute, from the perspective of didactics in experimental sciences, to guide Physics and Chemistry teachers in designing these SdA. It also aims to underscore the most suitable methodologies for teaching and learning sciences. Employing a case study design, this work systematically integrates curricular elements into the development of a SdA. A step-by-step description of its application is provided, contextualized with an example focused on radioactivity, its applications, and controversies. Following its partial implementation in a real-world setting with 66 3rd ESO students during the 2022-23 academic year, the study concludes by highlighting its positive impact on the scientific literacy of the participating students. This research serves as a valuable resource for educators seeking effective strategies in adapting to the educational changes introduced by LOMLOE.

Keywords: Scientific literacy; Scientific practices; History of Science; Socio-scientific controversy; Physics and Chemistry.

Para citar este artículo: Terrado Sieso, E.M., Cascarosa Salillas, E., Pozuelo Muñoz, J. y García Sánchez, F. (2024). Atómica y radiativa: una situación de aprendizaje en torno a la radiactividad, sus aplicaciones y controversias. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*. 21(3), 3203. doi:10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i3.3203

Introducción

La radiactividad es un fenómeno natural y artificial presente en diversos campos de la ciencia, la tecnología, la sociedad y el medio ambiente (CSN, 2016). En medicina, se utiliza en una variedad de técnicas de diagnóstico y de tratamiento (Baskar et al., 2012; Banerjee et al., 2022). Por otra parte, ocupa un lugar todavía muy relevante en la generación de energía en las centrales nucleares (IAEA, 2016), que en España producen más del 20% de la electricidad consumida (Foro nuclear, 2022). Asimismo, diferentes tipos de radiación son el fundamento de algunas técnicas experimentales utilizadas tanto en investigación como en la industria (Smith, 2014), incluso en datación arqueológica y en el mundo del arte (Rafecas, 2011). Quizás menos conocidas son las aplicaciones de isótopos en hidrología (Barbieri, 2019) o de técnicas radioisotópicas en agricultura (Amritpal et al., 2013), en conservación de alimentos (Gautam y Tripathi, 2016) y en control medioambiental (Anagnostakis, 2015). En exploración espacial, las pilas nucleares (Pathak et al., 2023) alimentan la instrumentación de satélites.

Aunque son solo algunos ejemplos, ilustran la presencia e impacto de la radiactividad en muchos ámbitos de la sociedad y justifican la necesidad de que el alumnado adquiera un conocimiento científico adecuado sobre el tema porque los fenómenos radioactivos y sus aplicaciones, como muchos desarrollos tecnológicos, no están exentos de riesgos y es necesario hablar también de seguridad, protección y gestión de residuos. La alfabetización científica sobre radiactividad resulta fundamental para opinar críticamente sobre riesgos y beneficios y participar con criterio en los debates públicos sobre su uso y regulación, como se deriva de la definición de persona científicamente educada (OECD, 2023). Tal premisa es el punto de origen de la pregunta de investigación que ha guiado este trabajo.

La radiactividad en el currículo LOMLOE

El actual marco legislativo español de la LOMLOE (Ley Orgánica por la que se modifica la Ley Orgánica de Educación) ha supuesto una nueva reforma curricular entre cuyas modificaciones más destacables estarían una apuesta firme por la educación competencial (López Rupérez, 2022) y el diseño de *situaciones de aprendizaje* como escenarios de trabajo para desarrollar ocho *competencias clave* (CC). La competencia STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemática) es una de ellas y se vincula al *perfil de salida* con cinco *descriptores* en los que se especifica lo que el alumnado debería ser capaz de hacer al finalizar la etapa.

García-Carmona (2023) identifica las materias curriculares como las plataformas para la adquisición de las CC, lo que, según Holbrook y Rannikmae (2007) en el caso las Ciencias, implica migrar desde la idea de «enseñar ciencia» a la de «educar desde o mediante la ciencia» para contribuir así a la *alfabetización científica* del alumnado, entendiendo ésta como «lo que una persona debe conocer, valorar y ser capaz de hacer para desenvolverse eficazmente en contextos donde la ciencia y la tecnología están presentes» (Romero-Ariza, 2017). La necesaria contribución específica a dicha alfabetización desde las asignaturas científicas (Rosales Sánchez et al., 2020) se ha tenido en cuenta en la pregunta de investigación del presente trabajo, que se formulará más adelante.

Todas las asignaturas deben contribuir en mayor o menor medida al desarrollo de todas las CC pero, para perfilar su contribución particular, se establecen *competencias específicas*

(CE). En paralelo, aparecen los criterios de evaluación como indicadores de logro de las CE, con una redacción muy genérica para que el profesorado pueda hacerlos propios y formular objetivos de aprendizaje específicos. Las actividades así desarrolladas permiten concretar también los saberes básicos (conocimientos, destrezas y actitudes) y el contexto en el que se van a introducir. En el caso de la Física y Química en la ESO estos saberes se agrupan en cinco bloques: las destrezas científicas básicas, la materia, la energía, la interacción y el cambio.

El término radiactividad no aparece explícitamente en el currículo, pero podría abordarse dentro del bloque de la materia: «Desarrollo histórico de los modelos atómicos, existencia, formación y propiedades de los isótopos» y «Descripción de las partículas subatómicas». Tampoco se habla de energía nuclear, si bien en el bloque de la energía debería considerarse para tratar «la obtención de energía eléctrica» o la «elaboración fundamentada de hipótesis sobre el medio ambiente y la sostenibilidad a partir de las diferencias entre fuentes de energía renovables y no renovables». Por otra parte, puesto que en el bloque de las destrezas científicas se explicita la «valoración de la cultura científica del papel de científicos y científicas en los principales hitos históricos y actuales de la física y la química», es asumible que algunos de los y las protagonistas del descubrimiento de la radiactividad podrían contribuir a la competencia STEM. Todo ello, junto con la vigencia del debate social en torno a sus aplicaciones, justifica desde la didáctica de las ciencias experimentales la relevancia de contribuir con propuestas pedagógicas contextualizadas en torno a la radiactividad que sirvan de referencia al profesorado en ESO.

Dificultades de aprendizaje y creencias sobre la radiactividad

Los átomos no pueden percibirse a través de los sentidos y, por tanto, la naturaleza corpuscular de la materia es un tema inherentemente abstracto que requiere del uso del pensamiento formal todavía en desarrollo en las edades en las que se cursa la ESO (Benarroch, 2000). La mayoría termina la Educación Primaria con un modelo continuo de la materia en la cabeza y sin concebir la existencia de vacío. Más aun, durante la ESO se les demandará que acepten no uno sino varios modelos atómicos (Johnson y Papageorgiou, 2010). Trabajar con modelos no definitivos y asumir que igualmente resultan útiles para explicar determinados fenómenos genera incompreensión e incertidumbre.

Respecto a las dificultades en torno a la radiactividad, Corbelle-Cao y Domínguez-Castiñeiras (2015) refieren la distinción entre radiactividad y radiación como la más habitual, pero también discernir entre radiación ionizante y no ionizante, entre partículas y ondas o la relación entre emisión radiactiva y el cambio en la naturaleza química del isótopo. A pesar de que la radiactividad no suele partir de ningún modelo escolar previo que reconstruir, los mismos autores recopilan las ideas previas provenientes en su mayoría de contextos extraescolares y con un marcado cariz negativo. Algunas de las creencias más representativas sobre la radiactividad son: «es un fenómeno artificial y peligrosa en cualquier dosis» (aunque cuando se emplea en medicina se percibe como algo menos nocivo); «se propaga como un gas a grandes distancias» (se confunde emisión radiactiva con transporte de material emisor); «si se ha sufrido exposición a ella, se acumula» (no se diferencia entre radiactividad, radiación ionizante y dosis); «los hornos microondas son radioactivos» (falacia pseudocientífica); «un objeto irradiado se convierte en emisor secundario y también es peligroso» (la radiactividad es contagiosa); «en una muestra radioactiva todos sus átomos son radioactivos»; «un mayor periodo de semidesintegración implica mayor peligro porque emite durante más tiempo» (se interpreta que la actividad es constante y en ésta no se tiene en cuenta la dosis). Estas concepciones derivan en una actitud de rechazo (García-Carmona y Criado, 2010) reforzada por el recuerdo de los

efectos devastadores de las bombas de Hiroshima y Nagasaki o el accidente de Chernóbil. Estos autores referencian que algunas de estas creencias existen también entre el profesorado de diferentes disciplinas y en la sociedad en general, siendo la radiactividad un tema con gran potencial para como controversia socio-científica.

Situaciones de aprendizaje para Física y Química

Retomando la LOMLOE, las situaciones de aprendizaje (en adelante, SdA) se introducen como «situaciones y actividades que implican el despliegue por parte del alumnado de actuaciones asociadas a CC y CE y que contribuyen a la adquisición y desarrollo de las mismas». Esta definición recuerda a los axiomas de algunos libros de texto en los que «la materia es aquello que tiene masa y ocupa un volumen, y la masa es aquello que está constituido por materia». No parece que sea un enunciado claro y de ahí el revuelo generado en la comunidad educativa. Por suerte, han aparecido rápidamente en la literatura aportaciones de expertos investigadores en didáctica de las ciencias experimentales que tratan de orientar en el diseño de SdA para Física y Química (García-Carmona, 2023; Domènech-Casal, 2023), apoyándose en planteamientos metodológicos bien alineados con la investigación del área. También en algunas de las concreciones curriculares a través de las correspondientes órdenes autonómicas se han incluido orientaciones didácticas y ejemplos con los que ilustrar su diseño. Sirva como muestra el Anexo II de la Orden ECD/1172/2022, en la comunidad autónoma de Aragón. En este referente para SdA en Física y Química se subraya la necesaria contextualización de la secuencia didáctica en situaciones cotidianas o reconocibles por el alumnado (King y Ritchie, 2012) para promover su interés y participación y que contribuyan al desarrollo de todas las dimensiones de su competencia científica (OECD, 2023). Para ello se propone la implementación de actividades basadas en las prácticas científicas (indagación, modelización y argumentación) (Muñoz-Campos et al., 2020; Caamaño, 2011) y se asumen los principios de diseño del modelo de aprendizaje por indagación (Pedaste et al., 2015; Romero-Ariza, 2017). Para facilitar el diseño de SdA se sugiere sistematizarlo en los siguientes apartados: Introducción y contextualización; Objetivos didácticos; Secuenciación didáctica; Relación con otras materias o competencias específicas; y Atención a la diversidad.

Sin embargo, y a pesar de todo lo anterior, todavía se echa en falta una conexión directa entre los elementos curriculares (competencias, saberes y criterios de evaluación) que guíe al profesorado en el diseño de sus propias SdA. Y éste fue otro de los propósitos de este trabajo.

Metodología

Como punto de partida del diseño metodológico se planteó la siguiente pregunta de investigación: *¿En qué medida puede una situación de aprendizaje vinculada a la radiactividad favorecer la alfabetización científica del alumnado de ESO?*

Para responder a esta cuestión se definieron los siguientes objetivos:

- OB1: Sistematizar el diseño de SdA para Física y Química en ESO a partir de la interconexión de los elementos curriculares de la LOMLOE.
- OB2: Diseñar una SdA contextualizada en la radiactividad y sus aplicaciones, e implementarla en un escenario real.
- OB3: Valorar la contribución de dicha SdA a la alfabetización científica del alumnado.

Respecto a los participantes en el estudio, además de los autores de este trabajo siendo uno de ellos docente-investigador, constituyeron la muestra de conveniencia 3 grupos de 3º ESO del IES Jerónimo Zurita de Zaragoza durante el curso académico 2022-23. El primero estuvo integrado por 21 estudiantes (10 chicos y 11 chicas), el segundo por 22 (11 chicos y 12 chicas) y el tercero por 23 (11 chicos y 12 chicas).

Con relación al diseño de la investigación, corresponde a un estudio de caso descriptivo observacional y con finalidad aplicada. Los instrumentos para la recogida de datos fueron las observaciones in-situ por parte del docente que guio las actividades en el aula y las anotaciones en su diario, las producciones orales y escritas del alumnado y un cuestionario de valoración. En relación con este último, se informó del carácter anónimo de las respuestas, que no tendrían ninguna repercusión en la evaluación académica y que solo serían utilizadas con fines de investigación. Los 66 participantes firmaron el correspondiente consentimiento informado.

Resultados

Con respecto al OB1, se analizaron en profundidad los textos legales relativos al currículo tanto a nivel nacional (Real Decreto 217/2022) como su concreción en la comunidad autónoma de Aragón a través de la Orden ECD/1172/2022. Como resultado del análisis, se ha podido concretar y describir de manera sistemática el contenido de los diferentes apartados que ha de tener una SdA.

En el primer apartado *Introducción y justificación* se argumenta la elección del tema sobre el que versa la SdA, se vincula a un curso concreto y se ubica en la programación global de la asignatura. En *Objetivos didácticos*, estos son específicos para cada SdA y se vinculan a determinados elementos curriculares (saberes y competencias específicas). No obstante, se tiene también en cuenta el contexto escolar específico, las ideas previas y las dificultades del alumnado. En *Secuenciación didáctica*, se describen las actividades previstas, las metodologías didácticas, los agrupamientos y la temporalización. Vincular la SdA de la Física y Química a otras CC distintas de la STEM pone de manifiesto la contribución transversal desde todas las materias al perfil de salida. En *Atención a la diversidad* se establecen acciones concretas con las que atender a las diferencias individuales de cada estudiante.

Como aportación recomendable es funcional incluir un apartado específico de *Evaluación*, donde se perfilan los instrumentos previstos a lo largo de la SdA para, en primer lugar, diagnosticar y hacer consciente al alumnado de sus conocimientos al inicio de la secuencia y, en segundo lugar, poder medir la evolución en el grado de consecución de los objetivos de aprendizaje.

Como resultado final, se ha diseñado la infografía que se muestra en la figura 1 para ilustrar los distintos elementos curriculares LOMLOE, su interconexión y su derivada final en una SdA específica para Física y Química.

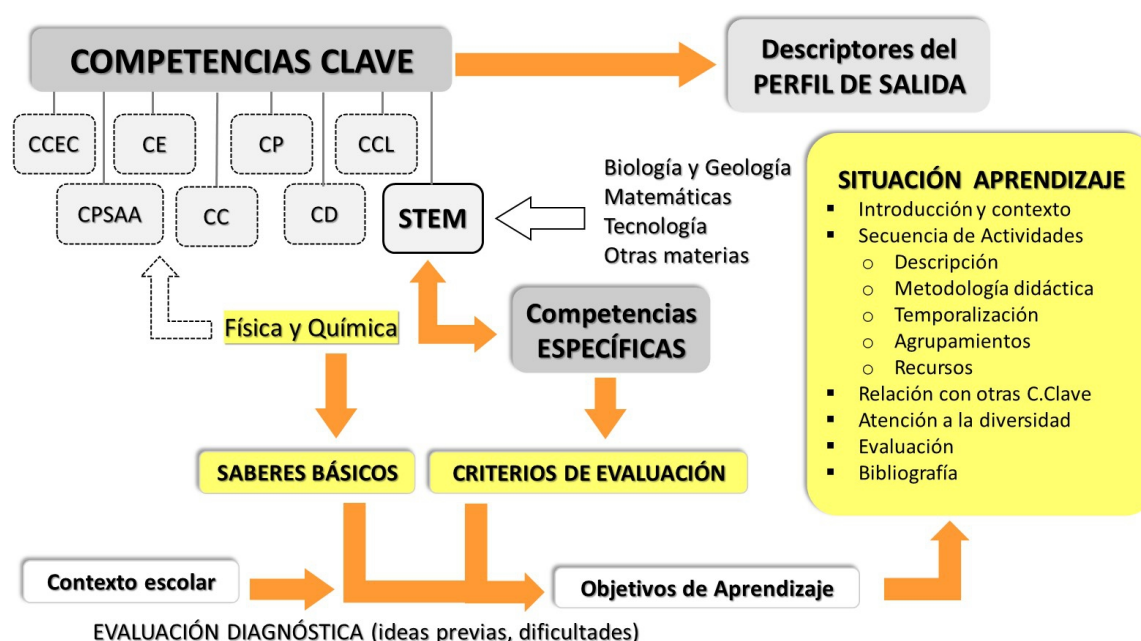


Figura 1. Interconexión en los elementos curriculares de la LOMLOE considerados en el diseño de una SdA para Física y Química en la ESO.

Como resultado del OB2, se ha detallado paso a paso, y en coherencia con el OB1, una SdA en torno a la radiactividad combinando metodologías coherentes con la investigación en el área de didáctica de las ciencias experimentales para que el alumnado llegue a comprender el fenómeno, sea capaz de relacionarlo con sus aplicaciones y pueda opinar sobre el tema desde una perspectiva crítica e informada en base al conocimiento científico. Solo se han podido implementar y evaluar algunas de las actividades de la SdA, si bien a continuación se describe el diseño y planificación en su totalidad para que sirva como guía completa a aquellos docentes de ESO o Bachillerato que quieran incluirla total o parcialmente en la programación de sus asignaturas.

Introducción y contextualización

¿La radiactividad es buena o es mala? ¿Es peligrosa? ¿Sus aplicaciones son necesarias o prescindibles? Para responder a estas preguntas u otras similares sobre el fenómeno, es ineludible tener asimilado previamente el modelo atómico de Rutherford con núcleo de Chadwick (RNC). De ahí el título de la SdA, *Atómica y Radiactiva*, que se plantea para Física y Química en el curso 3º de la ESO, con una estimación temporal de quince sesiones de 50 min, y vinculable principalmente a los bloques de las destrezas científicas, la materia y la energía, aunque también en menor medida al del cambio.

En el contexto global de la asignatura, se parte de sugerir que el alumnado haya trabajado en dos SdA previas. Con la SdA-1, se trataría de responder a preguntas como ¿Para qué sirve la Ciencia? ¿Cómo se hace Ciencia? ¿Por qué tenemos que saber de y sobre Ciencia? y se focalizaría especialmente en los aspectos epistémicos del trabajo científico y en el desarrollo de la identidad científica del alumnado (OECD, 2023) a través de actividades como las cajas misteriosas (Domènech-Casal, 2013) y la balanza de argumentos (Domènech-Casal, 2019).

La SdA-2, partiría de responder a preguntas como: ¿De qué estamos hechos los seres vivos? ¿Y las rocas? ¿Y el aire? ¿Por qué huele mi perfume? ¿Pesará lo mismo un huevo antes y después de cocerlo? En su desarrollo se habrá de garantizar que el alumnado transite desde el modelo continuo de materia hasta el modelo de Dalton, indagando con

experiencias prácticas sobre el comportamiento de los gases o discutiendo en torno a los experimentos históricos de Lavoisier y Proust para justificar la evolución histórica del modelo atómico (Figura 2).

En la SdA-3 (Atómica y Radiactiva) son experiencias prácticas sobre fenómenos electrostáticos y la interpretación de los resultados del experimento de Rutherford y su equipo las promotoras del cambio a los modelos de Thomson y de RNC, consecutiva y respectivamente (Figura 2).

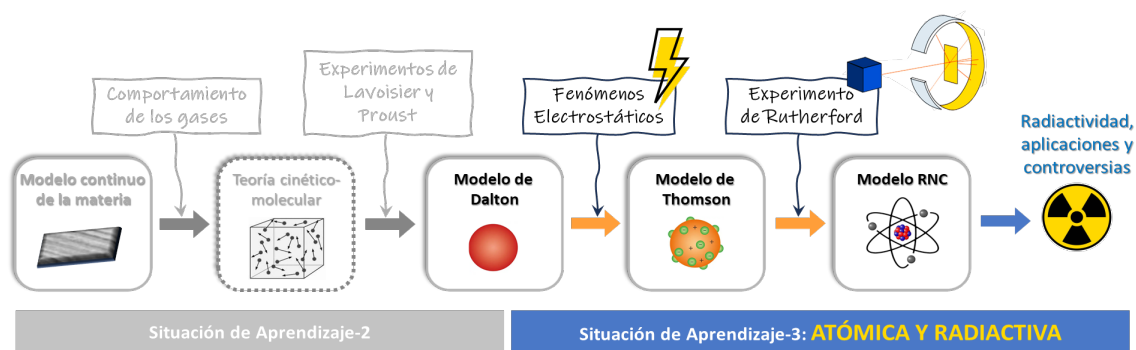


Figura 2. Representación del tránsito entre los distintos modelos atómicos en las SdA-2 y SdA-3, identificando experiencias prácticas y experimentos históricos que justifican su evolución hasta llegar a modelizar el átomo de RNC a partir del cual introducir la radiactividad, sus aplicaciones y controversias.

Finalmente, se podría plantear una SdA-4, en la que se abordaría de manera integrada, contextualizada y problematizada los aprendizajes relativos a la tabla periódica, la nomenclatura de compuestos químicos y las reacciones químicas, tratando de responder a preguntas como ¿Cómo se explican los distintos colores de los fuegos artificiales? ¿Tiene sentido el eslogan «calcio, calcio, de leche, de leche»? ¿Por qué la tabla periódica se ordena en filas y columnas? ¿Qué sucede cuando encendemos una vela? ¿Cómo funciona un air bag? e introduciendo actividades contextualizadas en situaciones cotidianas.

Objetivos de aprendizaje

Los objetivos de aprendizaje y las metodologías para su consecución conectan con todas las CE de Física y Química en la ESO. A continuación, en la tabla 1, se recoge la formulación resumida de estos, junto con la propuesta de concreción de saberes básicos para la SdA-3.

Todos los elementos curriculares de la SdA-3, y teniendo muy presente el contexto escolar concreto y las dificultades de aprendizaje en cuanto a comprender conceptos fundamentales relacionados tanto con los modelos atómicos como con el fenómeno de la radiactividad, convergen en los siguientes *objetivos de aprendizaje*:

- 1) Argumentar y consensuar la evolución del modelo atómico de Dalton hasta el de Thomson para poder explicar los fenómenos electrostáticos observados en experiencias sencillas de electrización por fricción.
- 2) Argumentar y consensuar la evolución del modelo atómico de Thomson hasta el de Rutherford para poder explicar las evidencias obtenidas en el experimento clásico de irradiación de una lámina de oro con un material radiactivo.
- 3) Construir el modelo RNC a través de una secuencia de indagación y modelización con materiales manipulativos y con una herramienta TIC.
- 4) Comprender la naturaleza de los isótopos, los tipos de radiación y el fenómeno de desintegración nuclear, a partir del modelo atómico RNC, y en base a esta

comprensión, identificar los errores conceptuales presentes en las ideas predominantes sobre radiactividad.

- 5) Reconocer la relevancia y el impacto ciencia-tecnología-sociedad y medio ambiente de algunas de las aplicaciones de la radiactividad.
- 6) Argumentar críticamente sobre las ventajas e inconvenientes de la obtención de electricidad a partir de la energía nuclear.
- 7) Valorar el papel de los referentes científicos, hombres y mujeres, que contribuyeron al descubrimiento de la radiactividad y sus aplicaciones.

Tabla 1. Competencias específicas y saberes básicos en *Atómica y Radiativa*.

Competencias específicas (Física y Química) ESO	
1.	Comprender y relacionar los motivos por los que ocurren fenómenos fisicoquímicos del entorno.
2.	Expresar observaciones en forma de preguntas, formular hipótesis para explicarlas y demostrarlas.
3.	Manejar el lenguaje de la ciencia.
4.	Utilizar de forma crítica, eficiente y segura plataformas digitales y recursos variados.
5.	Utilizar las estrategias propias del trabajo colaborativo.
6.	Comprender y valorar la ciencia como una construcción colectiva en continuo cambio y evolución, que requiere de interacción con el resto de la sociedad, y cuyos resultados repercuten en su avance tecnológico, económico, ambiental y social.
Saberes básicos (Física y Química) ESO	
•	Identificación y formulación de preguntas.
•	Trabajos páticos mediante indagación, modelización y argumentación.
•	Diversos entornos y recursos de aprendizaje científicos, materiales y tecnológicos.
•	Interpretación y producción de información científica utilizando diferentes formatos.
•	Valoración del papel de científicos y científicas en los hitos de la física y la química.
•	Modelos atómicos de Dalton, Thomson y Rutherford.
•	Número atómico y número másico.
•	Isótopos: definición, propiedades y estabilidad. Isótopos radiactivos.
•	Naturaleza eléctrica de la materia: fenómenos electrostáticos.
•	Energía nuclear para la generación de electricidad, seguridad y residuos.
•	Desintegraciones radiactivas y cambio químico.
•	Química nuclear: aplicaciones e implicaciones ciencia-tecnología-sociedad-medio ambiente.

Secuenciación didáctica

La SdA-3 se vertebra en ocho actividades cuyas metodologías y estrategias didácticas, agrupamientos y temporalización se presentan en la tabla 2.

De esta SdA-3 solo se han podido implementar las actividades A0, A5, A6, A7 y A8. Sin embargo, se describen todas las actividades con el fin de que el/la docente lectora de este trabajo pueda tenerlas de referencia. A continuación, se comentan una a una, a excepción de la A0 de la que se hablará en el apartado de *Evaluación*.

En la primera sesión de la actividad A1 se propone al alumnado diseñar una serie de actividades prácticas en las que experimenten frotando con un paño de fieltro tubos de distintos materiales (madera, metal, PVC) y acercándolos a globos, latas de refrescos, pelotas de ping-pong o confeti. Deben identificar variables que afectan al fenómeno observado (tipo de material, tiempo e intensidad de frotamiento, acercamiento a uno o varios objetos próximos etc.), dibujar las observaciones y tratar de explicarlas. En la segunda sesión, se pone en común las posibles interpretaciones y, con la guía del docente, se concluye la existencia de cargas eléctricas en los átomos (a pesar de ser globalmente neutros) que interaccionan (atracción o repulsión). Finalmente, se institucionaliza con el grupo-clase la transición desde el modelo de Dalton al de Thomson.

Tabla 2. Planificación de la secuencia de actividades para la situación de aprendizaje *Atómica y Radiactiva*.

	Actividades	Objetivos de aprendizaje	Metodología // Estrategia	Agrupamientos	Sesiones (50 min)
A0	<i>La radiactividad... ¿es buena o es mala?</i>	Evaluación diagnóstica	// Lluvia de ideas	Grupo-clase	1
A1	<i>Fenómenos electrostáticos</i>	OD1	Indagación y Modelización	Parejas Grupo-clase	2
A2	<i>Ayudantes de Rutherford</i>	OD2	Argumentación // Historia de la Ciencia	Grupos base	1
A3	<i>Construyendo átomos</i>	OD3	Indagación y Modelización	Parejas	2
A4	<i>Simulando núcleos</i>	OD3	Indagación y Modelización // Uso de TIC	Parejas	2
A5	<i>Seminario radiactivo. Desterrando mitos</i>	OD5	Metodología expositiva Aprendizaje cooperativo Argumentación	Grupos de expertos	2
A6	<i>Aplicaciones radiactivas</i>	OD4	Aprendizaje cooperativo // Enfoque CTSA	Grupos de expertos	2
A7	<i>¿Nucleares sí o nucleares no?</i>	OD6	Argumentación // Controversia socio-científica	Grupo-clase	1
A8	<i>Línea de tiempo radiactiva</i>	OD7	ABP Historia de la Ciencia	Grupos base	2

En la actividad A2 se proyecta una recreación del experimento histórico de exposición de una lámina de oro a un material radiactivo y se propone al alumnado que emita hipótesis sobre la interpretación de lo observado y, discutiendo en torno a las mismas, se consensúa el tránsito desde el modelo de Thomson (cargas negativas embebidas en una matriz cargada positivamente) al de Rutherford (átomo mayoritariamente vacío con un núcleo positivo en su interior). A continuación, el docente describe, apoyándose en imágenes y animaciones, otros experimentos históricos que permitieron identificar respectivamente a los electrones, protones y neutrones (en adelante e, p y n, respectivamente), y se habla en adelante del modelo atómico RNC, comentando que no es tampoco el modelo definitivo, aunque igualmente válido porque permite explicar muchos fenómenos físicos y químicos.

La primera sesión de la actividad A3 tiene como finalidad introducir los conceptos de número atómico (Z) y número másico (A) y en la segunda se consolidan los aprendizajes de la sesión anterior, se introduce el convenio de nomenclatura IUPAC para representar isótopos A_ZX y se muestra como Z permite identificar al elemento X en la tabla periódica. En ambas sesiones, en grupos heterogéneos de cuatro estudiantes (grupos base) y siguiendo un guion, se construyen sobre paños de fieltro maquetas de átomos utilizando canicas blancas y negras para representar protones y neutrones y bolitas minúsculas de papel para los electrones. En la primera parte se propone construir 4 especies isoelectrónicas (por ejemplo, 2p-1n-2e, 3p-1n-2e etc.) y en la segunda, tirando una vez 2 dados blancos (la suma es el número de protones) y varias veces 2 dados negros (la suma es el número de neutrones), se construyen isótopos aleatorios a partir de los cuales completar fichas como la que se muestra en la figura 3. Algunas de las preguntas que orientan la indagación son: ¿Qué podemos decir de las masas de p, n y e? ¿Cómo podemos expresar la masa de un átomo con un número entero? ¿Cambiará mucho la masa del átomo si añadimos otro e? ¿Con qué otro número entero podríamos diferenciar a 2 átomos con el mismo número de p? ¿Qué relación habrá entre p y e si el átomo es neutro? ¿Y entre n y e? Si arrancamos 1e, ¿el átomo seguirá siendo neutro? ¿y si lo añadimos?

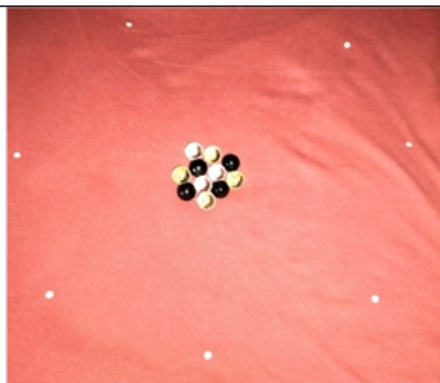
Por parejas, vamos a generar varios átomos aleatorios. Lanzad los dos dados blancos para obtener el número de protones que debéis usar. Lanzad los dos dados negros para saber el número de neutrones que debéis usar. Después, construid el átomo y responded a las preguntas.	
Número de protones obtenido: 7	
Número de neutrones obtenido: 4	
¿Cuántos electrones deberíamos colocar para que el átomo sea neutro? 7	
¿De qué elemento químico se trata? Consultadlo en la tabla periódica. Nitrógeno	
¿Cuál es la masa aproximadamente del átomo medida en canicas? 11 unidades	
¿Cómo denominamos a este isótopo concreto? Nitrógeno-11	
Símbolo oficial del isótopo (A_ZX): ${}^{11}_7N$	
Adjuntad una fotografía del átomo →	

Figura 3. Ficha de indagación guiada para modelizar el átomo RNC a partir de recursos manipulativos.

En la actividad A4, se utilizan dos simuladores virtuales (University of Colorado, 2024; University of Colorado, 2024b) con los que indagar sobre la estabilidad de diferentes núcleos, deducir patrones y modelizar las emisiones radiactivas como consecuencia de la inestabilidad nuclear, identificando al isótopo resultante y como, si el fenómeno se repite, se obtienen cadenas radiactivas. A cada pareja, se le asignan tres elementos con Z consecutivos, y anota si es estable o no el núcleo con Z fijo y cambiando A . Solo la puesta en común de los resultados del grupo-clase permite sacar conclusiones válidas (implícitamente se está trabajando la idea de la ciencia como constructo colectivo). Al construir el átomo de Uranio se evidencia que no tiene ningún isótopo estable y se consensúa que para estabilizarse emitirá partículas; p, n o las partículas alfa ($2p$, $2n$, $0e$). Se pide al alumnado que redacte un informe breve de los resultados de las actividades guiadas con el simulador, su interpretación y conclusiones.

La actividad A5 consiste en un seminario focalizado en la comprensión de conceptos básicos como la definición de radiactividad (emisión de partículas u ondas por parte de los núcleos atómicos), la diferencia entre radiación ionizante y no ionizante, la desintegración de los isótopos radiactivos como consecuencia de su inestabilidad, los tipos de emisiones y su alcance, medidores de radiactividad, peligros por exposición incontrolada, medidas de protección o seguridad y gestión de residuos. En la primera sesión, la exposición se apoya en imágenes, animaciones y empleo de analogías (González-Espada et al., 2022), cuidadosamente seleccionadas, con las que ya se ha evidenciado que se facilita el aprendizaje de fenómenos abstractos como la radiactividad (Cid Vidal et al., 2022). Seguidamente, se presentan las concepciones erróneas más habituales sobre el fenómeno y sus aplicaciones y, trabajando por parejas, se reparten entre grupos de expertos y se pide que argumenten desde el conocimiento científico para desmotar estos mitos. Los argumentos se discuten y validan (o no) mediante una puesta en común en el grupo-clase.

En la actividad A6 se implementa la técnica del puzzle de Aronson (Ibáñez, 2005) como estructura de aprendizaje cooperativo sobre cuatro aplicaciones CTSA: radiodiagnóstico y tratamiento de enfermedades, producción de electricidad, aplicaciones en arte (datación y restauración) y aplicaciones agroalimentarias y medioambientales. Partiendo de los grupos base, a cada estudiante se le asigna un campo de aplicación, del que será experto, y se reúne con el resto de expertos en su mismo tema para profundizar en él a partir de la lectura comprensiva y discusión de unos textos adaptados al contexto y elaborados por el propio docente. Después, de vuelta a los grupos base, se comparten los aprendizajes en

torno a cada campo de aplicación. Se puede pedir al alumnado que construyan mapas conceptuales o que formulen preguntas relativas a los textos con los que han trabajado.

En la actividad A7 se debate grupalmente sobre la conveniencia o no de una potencial instalación de una central nuclear en el entorno próximo al municipio de residencia. Al comienzo de la sesión, el docente expone datos reales de producción y consumo de electricidad en España y comenta algunas noticias recientes relacionadas con la construcción y el desmantelamiento de centrales nucleares, los cementerios de residuos radiactivos o la desnuclearización de algunos países. Inicialmente es previsible que la casi totalidad de estudiantes se posicionen en contra. Sin embargo, al solicitar argumentos se pretende que emanen diversos puntos de vista desde una postura crítica.

En la actividad A8 se propone al alumnado la construcción colectiva de una línea de tiempo sobre el descubrimiento de la radiactividad y sus protagonistas, incluyendo figuras como Bequerel, los Curie, Rutherford, los Joliot-Curie, Chadwick, Meitner u Oppenheimer. El docente ha preparado biografías de dos párrafos incluyendo retratos, banderas de los países de origen e imágenes representativas del trabajo de cada científico/a. Cada estudiante tiene la mitad de un texto y ha de encontrar a la pareja con la que reconstruirlo. Colectivamente, el grupo-clase los ordena cronológicamente y construye un mural, solapando cartulinas, que se expondrá en una zona común del centro. La actividad concluye con un diálogo socrático guiado por el docente sobre la importancia en ciencia de los hallazgos predecesores, el trabajo en grandes equipos, los contextos sociales y políticos en los que se desarrolla cada descubrimiento o el reconocimiento a las personas de ciencia por sus contribuciones, sesgado por prejuicios de género o nacionalidad. Es interesante identificar y ubicar en la tabla periódica los nuevos elementos químicos descubiertos en la época radiactiva para que sirvan de puente con la siguiente SdA.

Relación con otras competencias clave

Con el trabajo a lo largo de la SdA-3, además de a la STEM, también se contribuye a otras cinco de las competencias clave, concretamente a la de comunicación lingüística (CCL), a la digital (CD), a la ciudadana (CC), a la personal, social y de aprender a aprender (CPSAA). También se incluye la competencia plurilingüe (CP) si la materia se imparte en un contexto bilingüe o, al menos, los textos de las actividades A6 y A8, se proporcionan en una segunda lengua.

Atención a la diversidad

La variedad de metodologías y recursos utilizados en el diseño de la SdA-3 facilitan que el alumnado tenga que enfrentarse a distintos agrupamientos y escenarios de aprendizaje, algunos de los cuales le serán más o menos cómodos. Otras aproximaciones para atender a las diferencias individuales son la garantía de heterogeneidad de los grupos base y la asignación de roles o la adaptación de algunos materiales didácticos para el alumnado que lo requiera.

Evaluación

Como ya se ha comentado, es recomendable prever técnicas, instrumentos y recursos de evaluación que faciliten el seguimiento de los aprendizajes, garantizando momentos para la evaluación formativa y la retroalimentación y que sustenten una evaluación sumativa al desde una perspectiva competencial e integradora, esto es, una determinación cuantitativa o cualitativa (a criterio del docente) del nivel de logro respecto a los objetivos de aprendizaje.

Para la evaluación inicial (A0) se plantea una lluvia de ideas a partir de las preguntas ¿Qué te sugiere la palabra radiactividad? ¿Cómo definirías el fenómeno? ¿Dónde podrías

encontrarlo? El objetivo es hacer emerger las ideas previas sobre el tema y hacer consciente de ello al propio alumnado.

Para la dimensión formativa en la SdA-3 se pueden combinar varios instrumentos para evaluar los trabajos del alumnado, siendo éstos los informes elaborados en las actividades A1-2-3-4, la participación argumentada en las A5 y A7, y los productos colaborativos construidos en las A6 y A8. Son ejemplos a tener en cuenta el instrumento creado por Ferrés et al. (2015) para evaluar trabajos de indagación, el propuesto Cascarosa et al. (2019) para evaluar la argumentación o la rúbrica de Girón Gambero y Lupión Cobos (2022) para aprendizaje basado en proyectos (ABP).

Es recomendable que alguno de estos instrumentos se utilice en actividades de auto- y coevaluación (Navarrete-Artime y Belver Domínguez, 2022) para hacer partícipe y compartir el proceso de evaluación con el propio alumnado, como propone la LOMLOE.

Si se considera oportuno, se puede incluir alguna prueba escrita al finalizar la SdA-3, pero evitando preguntas cuya respuesta sea meramente reproductiva y priorizando preguntas de respuesta abierta en las que los estudiantes puedan movilizar sus aprendizajes en distintas situaciones de aplicación.

Por último, la LOMLOE insiste en que también se han de evaluar los procesos de enseñanza y la propia práctica docente. A ese respecto, es interesante que el profesorado elabore un diario o que sistematice en formato de fichas la observación de las sesiones. Posteriormente, al ser analizado (incluso en colaboración con otros docentes) se podrán identificar debilidades y fortalezas, y plantear acciones de mejora.

Una vez sistematizado el diseño de SdA para Física y Química y aplicado a un contexto concreto (*Atómica y Radiativa*), se presentan ahora los resultados de su implementación parcial (A0, A5, A6, A7 y A8) con tres grupos de estudiantes (un total de 66) de un IES público de Zaragoza en el contexto de la asignatura de Física y Química en 3º ESO durante el curso 2022-23.

Las ideas previas identificadas en la A0 a partir de la pregunta ¿Qué te sugiere la palabra radiactividad? se anotaron en la pizarra y el docente-investigador las registró en su cuaderno para posteriormente clasificarlas en seis categorías: Malo (catástrofes, guerras y accidentes), Académico (conceptos tratados en la asignatura anteriormente: ondas, partículas, átomo), Usos (radiografía, C-14, fisión y fusión), Elementos radiactivos (plomo, radio, uranio), Figuras científicas (Marie Curie, Oppenheimer, Einstein) y Otros (Hulk, los Simpson, Marvel). El análisis de los resultados (Figura 4) evidencia una percepción muy negativa del fenómeno, una vinculación casi exclusiva al contexto académico (con excepción de asociaciones a superhéroes y relatos de ficción), pocas referencias a elementos químicos y a figuras científicas y un gran desconocimiento de las aplicaciones radiactivas. A la pregunta final de si sabían en qué consistía exactamente la radiactividad y dónde encontrarla, nadie supo dar una definición, pero los tres grupos-clase coincidieron en asegurar que era algo malo, peligroso y letal, lo relacionaban con mutaciones y cáncer, y solo se podría encontrar después de lanzar una bomba atómica o tras un accidente en una central nuclear.

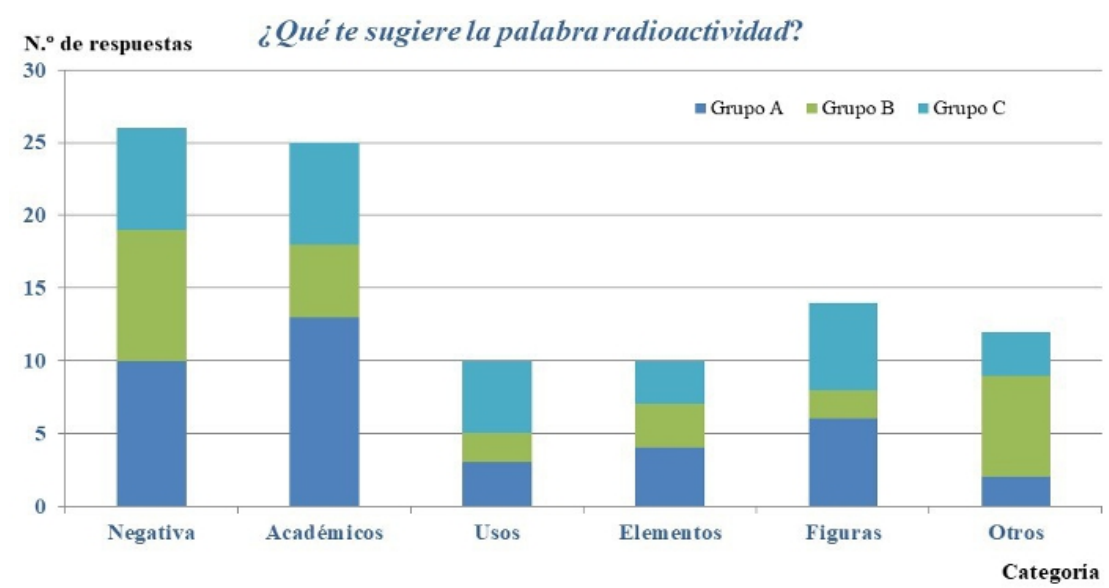


Figura 4. Análisis de respuestas en la A0 agrupadas por categorías conceptuales.

En la A5 es significativo comentar que fue fundamental la intervención del docente en la sesión "Desterrando mitos". Intencionadamente evitó dar respuestas directas a las preguntas que formulaban los estudiantes y trató de reconducirlas o replantearlas, rescatando los conceptos expuestos en el seminario anterior, para que fuesen ellos quienes llegasen a sus propias conclusiones, animándolos a argumentar con evidencias y sin penalizar las respuestas erróneas. Al finalizar la sesión, hubo una puesta en común para consensuar las respuestas correctas e institucionalizar los aprendizajes.

Respecto al desarrollo de las actividades A6 y A8, es reseñable en ambos casos, y así quedó registrado en el cuaderno del profesor, una elevada motivación manifiesta del alumnado, un buen clima de aula y un desempeño autónomo de las tareas, una vez explicada la dinámica de trabajo. Como producto de la A6 se pidió a cada grupo que elaborasen preguntas relativas a los 4 campos de aplicación de la radiactividad. El análisis con una escala de valoración de la redacción de estas preguntas reveló diferentes grados de comprensión entre el estudiantado: un 48% de preguntas relevantes y concretas (¿En qué se basa la Radioterapia?; ¿Qué es una reacción en cadena?; ¿Cuáles son las limitaciones de la datación por radiocarbono?) frente a un 32% más superficiales (¿Cuántas centrales hay en España?) o un 20% manifestando errores conceptuales (¿Cuántos isótopos tiene el carbono-14?). Con respecto a la A8, en la figura 5 se muestra la producción de uno de los grupos-clase.

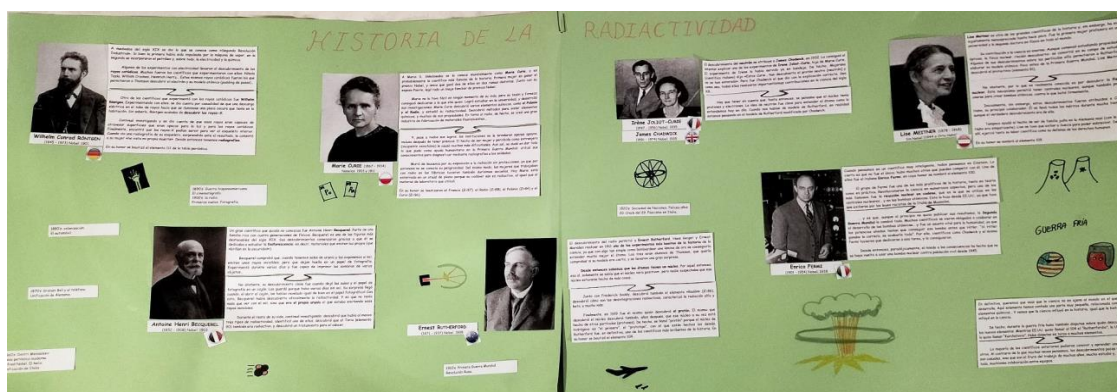


Figura 5. Línea de tiempo sobre la historia de la radiactividad y sus protagonistas construida por uno de los grupos-clase, previa al diálogo socrático.

Respecto a la actividad A7, el docente-investigador fue anotando el desarrollo del debate y las manifestaciones orales del alumnado en su cuaderno. Los primeros argumentos fueron mayoritariamente contrarios a la construcción de una central nuclear en su municipio, basados en emociones viscerales y en prejuicios. Esto tiene que ver con respuestas intuitivas basadas en la superficialidad (Carrascosa, 2005). Algunos ejemplos son los siguientes:

«En contra, porque no» (sin ningún argumento); «En contra, porque está en Zaragoza» (en otro lugar, les parecía bien); «En contra, porque lo dicen mis compañeros»; «En contra, porque España ya tiene varias»; «En contra, por si hay un accidente»; «A favor, porque si explota, no hay clase»

Estas respuestas no implicaban argumentaciones científicas, por lo que el docente siguió formulando cuestiones para forzarles a reflexionar. Por ejemplo, ¿os cuestionáis viajar o no en avión por el potencial peligro que implica?, y después comparó el riesgo de accidente aéreo con el de explosión nuclear. Parte del alumnado se interesó por saber cuál era la postura del propio profesor para posicionarse en consonancia, pero ésta no se reveló en ningún momento. También hubo estudiantes que realizaron preguntas para poder tomar una postura más razonada, como:

«¿Qué accidentes ha habido en el pasado, y por qué se produjeron?»; «¿Qué se hace con los residuos nucleares? ¿Adónde se llevan?»; «¿La energía renovable se puede acumular?»

Poco a poco, el debate evolucionó hacia posturas más intermedias y se valoraron los riesgos de manera comparada. También emergieron argumentos basados en el análisis reflexionado de factores y en razonamientos deductivos sobre el fenómeno de la radiactividad:

«En contra, porque el coste de construcción es muy alto»; «En contra, porque se trata de caminar hacia las renovables, no al revés»; «En contra, por los peligros para el ecosistema en caso de accidente»; «En contra, porque el vapor de agua también es un gas de efecto invernadero»; «En contra, porque es un peligro en caso de guerra o catástrofe natural»; «En contra, porque la ciencia está en constante evolución y se puede descubrir algún perjuicio que no se había tenido en cuenta»

«En contra, porque se contamina el embalse» (postura inicial), «Entonces a favor» (tras aclarar el funcionamiento de la central y entender que no contamina el embalse, aunque sí lo calienta)

«A favor, porque se necesita energía mientras hacemos la transición verde»; «A favor, porque debemos aprovechar los recursos disponibles»; «A favor, porque no emite CO₂ ni otros contaminantes»; «A favor, porque es muy barata una vez está en marcha»; «A favor, porque se necesita energía igualmente, y por tanto es mejor producirla de manera local. Es preferible no contaminar otro lugar, y además se ahorra en distribución»; «Se necesita una alternativa en caso de fallo de las renovables, y la tecnología actual está muy avanzada en materia de seguridad»

Analizando los registros, es destacable la evolución de los argumentos desde totalmente en contra hasta una posición más tolerante argumentando ventajas-oportunidades-necesidades, pero sin omitir los inconvenientes. Esta mejora argumental se promovió con preguntas "intencionales" planteadas por el docente. Dicha intencionalidad se guía por el trabajo de Uskola et al. (2021) en torno a la calidad de los argumentos en base a criterios de justificación, desventajas y posición contraria. Si un estudiante no argumentaba con pruebas y el resto no lo cuestionaba, el docente las solicitaba explícitamente. Si los

estudiantes se posicionaban en uno de los extremos, por ejemplo, a favor y enumerando solo ventajas, el docente preguntaba por posibles desventajas. Finalmente, en los momentos en los que el debate no avanzaba, el docente planteaba preguntas para que los estudiantes encontrarán pruebas que refutaran los argumentos de la posición contraria.

Finalizadas las actividades, se pasó una encuesta para la A6 y A7 (enfocadas principalmente a valorar al impacto de la metodología) en la que en forma de afirmaciones a puntuar con escala Likert (1: nada; 2: poco; 3: suficiente; 4: bastante; 5: mucho) el alumnado opinó anónimamente sobre su experiencia individual. Los resultados en términos de los estadísticos media (m) y desviación típica (σ), se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis de las respuestas a las diversas preguntas formuladas al alumnado, en forma de escala Likert (1: nada; 2: poco; 3: suficiente; 4: bastante; 5: mucho) al finalizar las actividades A6 y A7.

A6. Aplicaciones radiactivas (Puzle de Aronson)	m	σ
<i>La actividad me ha resultado útil para aprender sobre las aplicaciones radiactivas</i>	4,29	0,64
<i>He aprendido sobre las aplicaciones de las que era experto</i>	4,12	0,80
<i>He aprendido sobre las aplicaciones de las que no era experto</i>	3,58	1,01
<i>Mi grupo de expertos ha trabajado cooperativamente</i>	3,98	0,94
<i>Mi grupo base ha trabajado cooperativamente</i>	3,98	0,88
<i>Me he sentido cómoda/o trabajando en grupos</i>	4,33	1,10
<i>Prefiero este tipo de actividad a una exposición por parte del profesor/a</i>	4,63	0,64
A7. ¿Nucleares sí o nucleares no? (Debate en torno a controversia socio-científica)	m	σ
<i>La actividad me ha resultado útil para aprender sobre las centrales nucleares</i>	4,13	0,81
<i>Me interesa el tema sobre el que se ha discutido en el debate</i>	3,92	0,86
<i>Creo que a este tema se le da menos importancia de la que merece</i>	3,92	0,82
<i>Me he sentido cómoda/o dando mi opinión en el debate</i>	4,32	1,09
<i>Me gustaría hacer más debates en clase sobre temas de interés para la sociedad</i>	4,12	0,90

Se puede concluir que las valoraciones medias fueron muy satisfactorias en todos los ítems consultados (percepción de nivel de aprendizaje en cada actividad, utilidad de lo aprendido en la vida cotidiana, comodidad con el tipo de metodología o agrupamiento, etc.) aunque no se puede obviar que también las desviaciones fueron grandes, próximas a la unidad en su mayoría, lo que supone un salto cualitativo de un valor al siguiente. Estas discrepancias revelan una disparidad en las experiencias individuales que probablemente conectan con la diversidad de actitudes hacia el aprendizaje de la materia y a distintas preferencias metodológicas o intereses particulares.

Con relación al OB3, y como resultado con el que identificar la contribución desde la SdA descrita a la alfabetización científica de los y las estudiantes, se ha construido la tabla 4 en la que se correlacionan las tres dimensiones del conocimiento científico con las distintas actividades de la secuencia didáctica.

Tabla 4. Contribución a los 3 tipos de conocimiento científico desde la secuencia didáctica de la SdA *Atómica y Radiactiva*.

	Actividades	Tipo de conocimiento científico
A1	<i>Fenómenos electrostáticos</i>	Conceptual y Procedimental
A2	<i>Ayudantes de Rutherford</i>	Conceptual, Procedimental y Epistémico
A3	<i>Construyendo átomos</i>	Conceptual y Procedimental
A4	<i>Simulando núcleos</i>	Conceptual y Procedimental
A5	<i>Seminario radiactivo: desterrando mitos</i>	Conceptual y Epistémico
A6	<i>Aplicaciones radiactivas</i>	Conceptual
A7	<i>¿Nucleares sí o nucleares no?</i>	Procedimental y Epistémico
A8	<i>Línea de tiempo radiactiva</i>	Epistémico

Según Rosales Sánchez et al. (2020), la alfabetización científica implica saber ciencia, saber hacer ciencia y valorar la ciencia. Aunque algunos marcos consideran la competencia científica como un elemento de la alfabetización científica, muchos autores utilizan ambas como sinónimos. En cualquier caso, una persona científicamente alfabetizada es también científicamente competente. En el marco de la Evaluación de Competencias Científicas PISA 2025 (OECD, 2023) se demanda del alumnado evaluado la aplicación en situaciones contextualizadas de los tres tipos de conocimiento científico. El conceptual implica identificar modelos y aplicarlos a la explicación de fenómenos. En la SdA descrita estaría presente en todas las actividades, pero principalmente en las A1-2-3-4-5-6. El procedimental se refiere a la dimensión competencial de la indagación científica (formular preguntas, proponer hipótesis, identificar variables y diseñar experimentos e interpretar datos de manera crítica para sacar conclusiones. Se movilizaría intencionadamente en las A1-2-3-4-7. Por último, el epistémico, tiene que ver con comprender la naturaleza de la ciencia y los mecanismos de validación en la comunidad científica, para poder buscar, evaluar y utilizar información científica fiable en base a la cual tomar decisiones y actuar. En este caso, dentro de la SdA, adquiere especial relevancia en las A2-5-7-8.

Conclusiones

En el apartado anterior se han presentado los diferentes resultados que evidencian la consecución de todos los objetivos del estudio.

Para el primero, a través del análisis de la normativa LOMLOE tanto nacional como autonómica, se ha conseguido sistematizar el diseño de SdA para una asignatura de Física y Química en ESO, interconectando todos los elementos curriculares. El procedimiento se ha sintetizado en forma de infografía.

Para el segundo, el producto del objetivo anterior se ha aplicado, paso a paso, a una SdA en torno a la radiactividad y sus aplicaciones (*Atómica y Radioactiva*). En su justificación y contextualización también se aportan ideas para diseñar SdA del resto de la asignatura, orientando, en consecuencia, la planificación completa de la asignatura de Física y Química, lo que puede ser de gran interés para los docentes que la imparten y que, en muchos casos, no terminan de tener claro como encajar todos los elementos curriculares y las exigencias del nuevo marco legislativo.

Cinco de las actividades de la secuencia didáctica se han implementado con 66 de estudiantes, repartidos en tres grupos preexistentes de un mismo centro educativo, y se han registrado y analizado los datos sobre su desarrollo en el aula.

A pesar de que la SdA-3 descrita en detalle se vinculó al curso de 3º de la ESO para poder trabajar con saberes y criterios de evaluación concretos, es razonable plantear que la secuencia se puede adaptar o modificar para ser aplicable en otros cursos. Algunas de las actividades de manera aislada se pueden utilizar también en otras asignaturas de la misma etapa, por ejemplo, Ciencias Aplicadas, Ciencias Sociales o Ética.

Para el tercer objetivo, y desde un análisis reflexivo sobre el propio diseño y su desarrollo en un escenario real, se ha podido valorar la contribución de dicha SdA-3 a la alfabetización científica del alumnado desde los tres tipos de conocimiento científico.

Adicionalmente, con este estudio se pone en valor la importancia de una cuidadosa selección de las metodologías didácticas respaldadas por la investigación en didáctica de las ciencias experimentales para progresar en la alfabetización científica del alumnado.

Como limitación del trabajo, no se puede omitir el hecho de que la SdA no se ha implementado íntegramente, pero igualmente ha aportado evidencias que apuntan hacia un impacto positivo en los aprendizajes competenciales del alumnado.

Como línea de trabajo inminente, se pretende evaluar la utilidad de esta propuesta de diseño de SdA, aplicándola en torno a otros contenidos curriculares de la misma materia científica u otras afines y en diferentes cursos, y dejándola en manos de los propios docentes de los centros escolares cuya validación es fundamental para identificar las fortalezas y debilidades del diseño, e introducir cambios o matices si se considera necesario.

Agradecimientos

Los autores agradecemos al Instituto IUCA, de la Universidad de Zaragoza, su respaldo en esta investigación.

Referencias

- Amritpal K., Jaspreet S. y Balwinder S. (2013) Applications of Radioisotopes in Agriculture. *International Journal of Biotechnology and Bioengineering Research*, 4(3), 167-174.
- Anagnostakis, M.J. (2015). Environmental radioactivity measurements and applications - Difficulties, current status and future trends. *Radiation Physics and Chemistry*, 116, 3-7. <https://10.1016/j.radphyschem.2015.04.021>
- Banerjee, S., Basu, S., Baheti, A.D., Kulkarni, S., Rangarajan, V., Nayak, P., Murthy, V., Kumar, A., Laskar, S.G., Agarwal, J.P., Gupta, S. y Badwe, R.A. (2022). Radiation and radioisotopes for human health applications. *Current Science*, 123(3), 388-395. <https://doi.org/10.18520/cs/v123/i3/388-395>
- Barbieri, M. (2019). Isotopes in Hydrology and Hydrogeology. *Water*, 11, 291. <http://doi.org/10.3390/w11020291>
- Baskar, R., Lee, K.A., Yeo, R. y Yeoh, K.W. (2012). Cancer and radiation therapy: current advances and future directions. *International Journal of Medical Sciences*, 9(3), 193-199. <https://doi.org/10.7150/ijms.3635>
- Benarroch, A. (2000). El desarrollo cognoscitivo de los estudiantes en el área de la naturaleza corpuscular de la materia. *Enseñanza de las ciencias*, 18 (2), 235-246. <https://ensciencias.uab.cat/article/view/v18-n2-benarroch/1949>
- Caamaño, A. (2011). Enseñar química mediante la contextualización, la indagación y la modelización. *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 69, 21-34.

- Cascarosa, E., García, M. y Pozuelo, J. (2019). El debate en ciencias: gana el equipo que mejor argumente. *REIDOCREA*, 9, 15-20.
- Carrascosa, J. (2005). El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (parte II). El cambio de concepciones alternativas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2(3), 388-402. http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2005.v2.i3.07
- Chung, F.H. y Smith, D.K (ed.). (2014). Industrial Applications of X-Ray Diffraction. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16940>
- Cid Vidal, X., Cid Manzano, R. y Valiña Lema, I. (2022). An Experimental Analogy for Teaching the Law of Radioactive Decays in Secondary School Classrooms. *The Physics Teacher*, 60, 690-693. <https://doi.org/10.1119/5.0055748>
- CSN, Consejo de Seguridad Nuclear. (2016). *Las radiaciones en la vida diaria*. CSN. <https://www.csn.es/documents/10182/914805/Las+radiaciones+en+la+vida+diaria>
- Corbelle-Cao, J. y Domínguez-Castiñeiras, J. M. (2015). Estado de la cuestión sobre el aprendizaje y la enseñanza de la radiactividad en la educación secundaria. *Enseñanza de las Ciencias*, 33(3), 137-158. <http://dx.doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1807>
- Domènech-Casal, J. (2013). Las Mystery Boxes: una actividad sencilla de indagación en el aula como metáfora de la ciencia. *Revista Ciències*, 24, 102-125. <https://revistes.ua-b.cat/ciencies/article/view/n24-domenech>
- Domènech-Casal, J. (2019). Escalas de certidumbre y balanzas de argumentos. Una experiencia de construcción de marcos epistemológicos para el trabajo con pseudociencias en Secundaria. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 3(2), 37-53. <https://doi.org/10.17979/arec.2019.3.2.4930>
- Domènech-Casal, J. (2023). Situaciones de Aprendizaje. Ideas para el despliegue curricular de las ciencias. *Revista Ciències*, 45, 73-86. <https://doi.org/10.5565/rev/ciencies.469>
- Ferrés, C., Sanmartí, N. y Marbá, A. (2015). ¿Cómo evaluar los trabajos de indagación del alumnado? *Alambique, didáctica de las Ciencias Experimentales*, 80.
- Foro nuclear (2022). *Resultados nucleares de 2022 y perspectivas de futuro* (informe). <https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2023/04/Resultados-nucleares-de-2022.pdf?x69276>
- García-Carmona, A. (2023). Diseño de situaciones de aprendizaje en física y química conforme a la LOMLOE. *Ápice. Revista de Educación Científica*, 7(1), 109-127. <https://doi.org/10.17979/arec.2023.7.1.9436>
- García-Carmona, A. y Criado, A.M. (2010). La competencia social y ciudadana desde la educación científica: una experiencia en torno a la energía nuclear. *Investigación en la escuela*, 71, 25-38. <https://doi.org/10.12765/IE.2010.i71.03>
- Gautam, S. y Tripathi, J. (2016). Food Processing by Irradiation: An effective technology for food safety and security. *Indian journal of experimental biology*, 54, 700-707.
- Girón Gambero, J.R. y Lupión Cobos, T. (2022). Estudio de la luz con ABP sobre mascarillas. *Alambique, Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 110, 60-65.

- Gobierno de Aragón. (2022). Orden ECD/1172/2022, por la que se aprueban el currículo y las características de la evaluación de la Educación Secundaria Obligatoria y se autoriza su aplicación en los centros docentes de la Comunidad Autónoma de Aragón. *Boletín Oficial de Aragón*, No 156, 11 de agosto de 2022. <https://educa.aragon.es/documents/20126/521996/Orden+para+web+%283%29Secundaria.pdf>
- González-Espada, W., Gallenstein, K. y Collins, K. (2022). Food Processing by Irradiation: An effective technology for food safety and security. *The Physics Teacher*, 60, 653-655. <https://doi.org/10.1119/5.0055836>
- Holbrook, J. y Rannikmae, M. (2007). The nature of science education for enhancing scientific literacy. *International Journal of Science Education*, 29(11), 1347–1362. <https://doi.org/10.1080/09500690601007549>
- Ibáñez, V.E. (2005). El puzle: una técnica de aprendizaje cooperativo sencilla y gratificante para profesorado y alumnado. *Alambique, didáctica de las Ciencias Experimentales*, 45, 27-33.
- IAEA, International Atomic Energy Agency (2016). *Nuclear power and sustainable development*. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1754web-26894285.pdf>
- Johnson, P. y Papageorgiou, G. (2010). Rethinking the Introduction of Particle Theory: A Substance-Based Framework. *Journal of Research in Science*, 47(2), 130-150. <https://doi.org/10.1002/tea.20296>
- King, D. y Ritchie, S.M. (2012). Learning science through real-world contexts. En B. J. Fraser, K. G. Tobin y C. J. McRobbie (Eds.), *Second International Handbook of Science Education* (pp 69-79). Springer.
- López Rupérez, F. (2022). El enfoque del currículo por competencias. Un análisis de la LOMLOE. *Revista española de pedagogía*, 80(281), 55-68. <https://doi.org/10.22550/REP80-1-2022-05>
- Ministerio de Educación y Formación Profesional. (2022). Real Decreto 217/2022, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria. *Boletín Oficial del Estado*, No 4975, 29 de marzo de 2022. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/03/29/217/con>
- Muñoz-Campos, V., Franco-Mariscal, A.J. y Blanco-López, A. (2020) Integración de prácticas científicas de argumentación, indagación y modelización en un contexto de la vida diaria. Valoraciones de estudiantes de secundaria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 17(3), 3201. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i3.3201
- Navarrete-Artime, C. y Belver Domínguez, J. L. (2022). Evaluar con rúbricas. Una propuesta exitosa dentro del ABP. *Revista Iberoamericana de Evaluación Educativa*, 15(1), 101-117. <https://doi.org/10.15366/rieec2022.15.1.006>
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development. (2023). *Marco de evaluación de Ciencia PISA 2021*. https://pisa-framework.oecd.org/science-2025/per_spa/
- Pathak, A.D., Saha, S., Bharti, V.K., Gaikwad, M.M y Sharma, C.S. (2023). A review on battery technology for space application. *Journal of Energy Storage*, 61, 106792. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106792>

- Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., de Jong, T., van Riesen, S. A. N., Kamp, E. T., Manoli, C. C., Zacharia, Z. C. y Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational Research Review*, 14, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003>
- Rafecas, I. (2011). Una miscelánea de aplicaciones de la radiactividad y las radiaciones ionizantes. *Nuclear España*, 316, 38-42. <https://www.revistanuclear.es/wp-content/uploads/hemeroteca/316/NE316-09.pdf>
- Rosales Sánchez, E. M., Rodríguez Ortega, P. G., y Romero Ariza, M. (2020). Conocimiento, demanda cognitiva y contextos en la evaluación de la alfabetización científica en PISA. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17(2), 2302. https://10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i2.2302
- Romero-Ariza, M. (2017). El aprendizaje por indagación, ¿existen suficientes evidencias sobre sus beneficios en la enseñanza de las ciencias? *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 14(2), 286-299. <http://hdl.handle.net/10498/19218>
- University of Colorado. (2024). *Build a nucleus*. https://phet.colorado.edu/sims/html/build-a-nucleus/latest/build-a-nucleus_es.html
- University of Colorado. (2024b). *Build an atom*. https://phet.colorado.edu/sims/html/build-an-atom/latest/build-an-atom_es.html
- Uskola A., Burgoa B. y Maguregi G. (2021) Integración del conocimiento científico en la argumentación sobre temas científicos. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(1), 1101. https://10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2021.v18.i1.1101