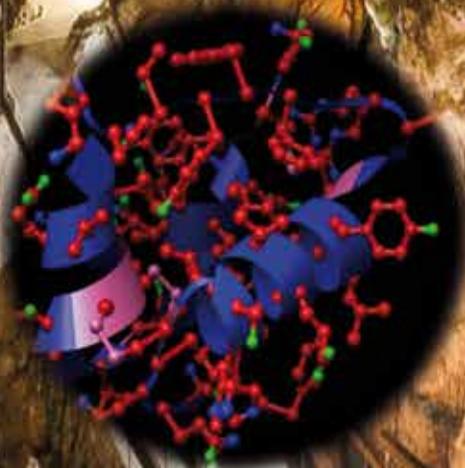


PASAJE A LA CIENCIA

IES ANTONIO DE MENDOZA

ALCALÁ LA REAL



NÚMERO 23

JUNIO 2022

Coordinadora:
Rosa M^a Cuenca Trujillo

Editores
Eva Aguilera Herrador. *Dpto. CCNN*
Rosa M^a Cuenca Trujillo. *Dpto. CCNN*
Antonio Heredia Rufián. (Jub.) *Dpto. Geografía e Historia*
José Hidalgo Romero. *Director*
Juan Manuel León Millán. *Dpto. CCSS*
Patricia Pérez López. *Dpto. CCNN*
Ascensión Rabaneda Jiménez. *Dpto. Inglés*
(Todos, del IES Antonio de Mendoza, Alcalá la Real)

Diseño de cubierta:
Juan Manuel León Millán

Encargado de la Web:
GRUPO DE TRABAJO WEB PASAJE IES ANTONIO DE MENDOZA



Colabora:
Área de Cultura del Excmo. Ayuntamiento de Alcalá la Real.

I.E.S. Antonio de Mendoza
Consejería de Educación
Pasaje del Coto s/n
23680 Alcalá la Real
D.L. J-268-2005
ISSN 1699-6305

<http://www.pasajealaciencia.es>

Geología

Índice

Editorial _____	5
------------------------	----------

GEOLOGÍA, ACTIVIDAD SÍSMICA Y VOLCANES

La Cueva de Nerja: un laboratorio natural para conocer los cambios climáticos pasados, presentes y futuros _____	7
---	----------

Concepción Jiménez de Cisneros Vencelá

Investigadora del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR)

Enseñanza de geología. Tendencias recientes _____	17
--	-----------

Enrique García de la Torre

Profesor del IES el Tablero, Córdoba

Erupción de Cumbre Vieja en la Palma, Islas Canarias. Septiembre de 2021: una ventana a la investigación volcanológica _____	23
---	-----------

Jane H. Scarrow

Geóloga de la Universidad de Granada

El uso de la Inteligencia Artificial (IA) para producir erupciones volcánicas _____	36
--	-----------

Jesús M. Ibáñez

Departamento de Física Teórica y del Cosmos de la Facultad de Ciencias de Granada e Instituto Andaluz de Geofísica de la Universidad de Granada

Radiografías de los volcanes _____	47
---	-----------

Jesús M. Ibáñez, Janire Prudencio^{1,2}

Departamento de Física Teórica y del Cosmos de la Facultad de Ciencias de Granada e Instituto Andaluz de Geofísica de la Universidad de Granada

Los volcanes en la historia de la humanidad _____	58
--	-----------

Jesús M. Ibáñez¹, Mauricio Bretón²

¹ Departamento de Física Teórica y del Cosmos e Instituto Andaluz de Geofísica ambos de la Universidad de Granada

² Centro de Estudios Volcanológicos de la Universidad de Colima en México

MUJER Y CIENCIA

Mujeres investigadoras en la Universidad de Jaén _____	84
---	-----------

Salud M^a Bermúdez Sáez. Luna Rosales Palomino

Alumnas de 4º ESO en el IES Antonio de Mendoza

M^a Patricia Pérez López

Profesora de Biología y Geología del IES Antonio de Mendoza

INVESTIGADORES LOCALES

- Francisco Coello: La forja de un geógrafo** _____ **89**
José Antonio Nieto Calmaestra
Geógrafo. Asesor Técnico de la Junta de Andalucía

CONMEMORACIONES

- 40 años del VIH. La importancia de protegerse** _____ **94**
Marina Castillo. Samuel Prados. África Toro.
Alumnado de 3º de ESO en el IES Antonio de Mendoza
M^a Patricia Pérez López
Profesora de Biología y Geología en el IES Antonio de Mendoza _____

- 100 años de insulina. Uno de los grandes descubrimientos del siglo XX** _____ **100**
Claudia Jiménez Cano
Alumna de 3º de ESO en el IES Antonio de Mendoza
M^a Patricia Pérez López
Profesora de Biología y Geología en el IES Antonio de Mendoza

- 80 años del Plutonio. ¿Qué sabemos de él?** _____ **105**
Macarena Jiménez, Raquel Nieto
Alumnas de 3º de ESO en el IES Antonio de Mendoza
Rosa M^a Cuenca Trujillo
Profesora de Física y Química en el IES Antonio de Mendoza

SALUD Y ENFERMEDAD EN ALCALÁ LA REAL

- Dos años de Pandemia Covid-19 en Alcalá la Real** _____ **110**
Antonio Heredia Rufián.
Profesor de Geografía e Historia (jubilado). IES Antonio de Mendoza. Alcalá la Real
Antonio Quesada Ramos.
Profesor de Biología IES Zaidín Vergeles. Granada

25 ANIVERSARIO IES ANTONIO DE MENDOZA

- Química farmacéutica: contexto histórico y actual del proceso de obtención de un fármaco** _____ **120**
José Manuel Espejo Román
Departamento de Química Farmacéutica y Orgánica de la Facultad de Farmacia de Granada.
Centro de Genómica e Investigación Oncológica de la Universidad de Granada.

- Covid-19 y afeción de los derechos fundamentales** _____ **131**
Sandra Mesa Pérez
Jueza en prácticas

Arte y Ajedrez _____ **141**

Manuel Bahos Farfán

Profesor de Matemáticas del IES Miraflores de los Ángeles de Málaga y Coordinador y miembro del Equipo de Coordinación pedagógica del programa aula de Jaque.

“Aerospace Mendoza” IV Bilingual Fair en el IES Antonio de Mendoza _____ **145**

Ascensión Rabaneda Jiménez

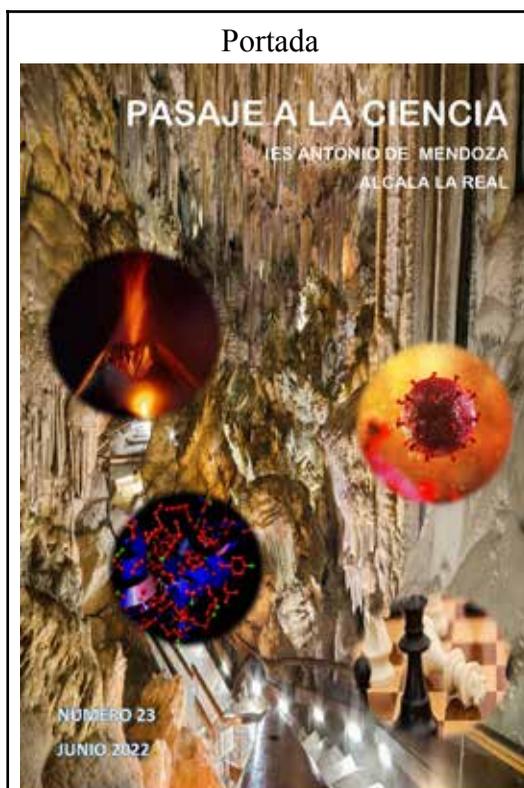
Profesora de Inglés y Coordinadora del programa bilingüe en el IES Antonio de Mendoza

Víctor Fuentes Martínez

Profesor de TIC y Coordinador proyectos STEAM en el IES Antonio de Mendoza

Ignacio López Anguita

Alumno de 2ºB en el IES Antonio de Mendoza



Diseño de portada: Juan Manuel León. Imágenes obtenidas de la web oficial cuevasdenerja.es, del diario el País y de wikipedia

Geología

¡Un año más os damos la bienvenida a Pasaje a la Ciencia! Durante este curso escolar, nuestro reto ha sido continuar con la labor científica que se empezó hace ya 24 años, y de esta forma llegar cada vez a las manos de más y más gente comprometida con la investigación o simplemente con pasar un buen rato de lectura. No olvidemos que también se puede consultar la revista de forma digital.

Este año, la temática general de la revista es la Geología, sin duda fue elegida por unanimidad por todos los que formamos parte de este proyecto, ya que el estudio de la estructura y dinámica de la tierra es fundamental para cuidar nuestro planeta y adelantarnos a las fuerzas de la naturaleza que en ocasiones pueden acarrear desastres personales o materiales, como fue el caso del Volcán de la Palma, en septiembre de 2021. Jane Scarrow, geóloga de la Universidad de Granada ha trabajado codo con codo con el Instituto de Volcanología de la Palma para analizar y explicar lo que ocurrió. Lo tenéis en el tercer artículo.

Si echáis un vistazo a la cubierta del Pasaje, que en esta ocasión ha diseñado Juanma (editor, autor y compañero de fatigas), podréis intuir la temática del resto de artículos de este número. No obstante os voy a ir contando brevemente de qué van.

En la primera sección, GEOLOGÍA, ACTIVIDAD SÍSMICA Y VOLCANES descubrimos la relación entre la Cueva de Nerja y los cambios climáticos pasados, presentes y futuros, de la mano de la investigadora del CSIC, Concepción Jiménez. A continuación, Enrique García, profesor de Geología en Córdoba, nos habla del compromiso que tenemos, como ciudadanos, de conocer cómo funciona la Tierra y relacionarlo con los problemas de la sociedad.

En cuanto a vulcanología el grupo de investigación de Jesús Ibáñez de la Universidad de Granada, utiliza la inteligencia artificial para predecir las erupciones volcánicas y así poder mitigar los efectos sobre la población. Para ello primero habrá que conocer la estructura interna de un volcán, así como realizar una “radiografía de la Tierra” como nos explica Jesús M. Ibáñez y Janire Prudencio. Finalmente podremos conocer el impacto de los volcanes sobre la humanidad por parte de Jesús M. Ibáñez y Mauricio Bretón.

En la siguiente sección, MUJER Y CIENCIA, dos alumnas de 4º ESO de Ciencias dirigidas por la profesora Patricia Pérez del IES Antonio de Mendoza, nos presentan a dos profesoras de la Universidad de Jaén también comprometidas con la investigación, en este caso en el campo de la Biología Marina y la Ecología, a las que conocieron en el campus de verano de investigación de la Universidad de Jaén

Continuamos como es costumbre con la sección de INVESTIGADORES LOCALES, con el geógrafo asesor de la Junta de Andalucía, José Antonio Nieto, que realiza una biografía de un jiennense ilustre del siglo XIX, Francisco Coello, el cual contribuyó a aumentar el conocimiento geográfico de las bases de la cartografía moderna de España.

Y manteniendo nuevamente siempre vivo el recuerdo de algunos eventos que han marcado nuestra historia, pasamos a las CONMEMORACIONES. En esta ocasión la sección la han realizado íntegramente alumnado de 3º y 4º de la ESO, dirigido por las profesoras de Ciencias, Patricia Pérez y Rosa Mª Cuenca. Así podremos recordar los “40 años del VIH” “100 años de la insulina” o “80 años del plutonio”.

Pasamos a la penúltima sección SALUD Y ENFERMEDAD en Alcalá la Real donde nuestros más fieles colaboradores, Antonio Heredia y Antonio Quesada, una vez más dentro de su

estudio de investigación sobre las epidemias en la provincia de Jaén, nos hacen balance de los dos años de la Covid-19 en Alcalá la Real.

Este año hemos creado un apartado especial con ocasión de la conmemoración del 25 aniversario de nuestro instituto. Dentro de la diversidad de actividades que se han realizado y que tengan relación con esta publicación caben destacar las conferencias de algunos exalumnos del centro, que sirvieron para calar en nuestro alumnado mostrándoles lo importante que es la educación pero desde el punto de vista de personas muy jóvenes que hasta hace poco estaban sentados donde ellos y que ahora están trabajando y han conseguido numerosos logros. Por ello, dos de los invitados, José Manuel Espejo (doctorando de la Facultad de Farmacia de Granada) y Sandra Mesa (Jueza en prácticas) han querido aportar su granito de arena al Pasaje, hablándonos de la historia de la química farmacéutica y la limitación de los derechos fundamentales que sufrimos cuando se declaró el estado de alarma debido a la Covid-19 respectivamente.

Otra actividad del 25 aniversario de la que nos deja su aportación Manuel Bahos, profesor de matemáticas de un IES de Málaga y uno de los creadores del proyecto “Arte y Ajedrez”, ha sido el 1^{er} Torneo Interprovincial de Ajedrez Musical celebrado el 11 de mayo de 2022 en el IES Antonio de Mendoza, este proyecto singular que tanto ha gustado a la comunidad educativa, tuvo otros dos creadores, nuestro Víctor Fuentes, compañero del IES del Dpto. de TIC y Javier Jiménez del IES Sierra de Mijas.

Finalmente hemos querido destacar la actividad de puertas abiertas “Aerospace Mendoza” dentro de la Feria Bilingüe que coordina nuestra compañera del IES y del equipo de edición, Ascen; aunque este evento se celebra todos los años en el instituto, en esta ocasión la mencionamos aquí por su relación con la Ciencia y el proyecto STEAM (Investigación Aeroespacial aplicada al aula) que ha dirigido nuestro también compañero del IES, Víctor Fuentes.

Pues ésto ha sido todo en cuanto a la presentación de la revista de este año, no quiero alargarme más para que empecéis cuanto antes a disfrutar con la lectura de estos apasionantes artículos. Como siempre ha sido un placer coordinar el trabajo que no hubiera sido posible sin todo el equipo que formamos el Pasaje; mil gracias a todos los que habéis participado de un modo u otro: equipo directivo y profes del IES, a M^a José, de la imprenta; al Excmo. Ayuntamiento de Alcalá la Real, y por supuesto a todos los autores y editores que habéis hecho posible que la revista saliera un años más, y para terminar agradecer a Antonio Heredia (exdirector del IES y fiel colaborador) por su ayuda y porque una vez más ha tirado del carro con la paciencia y sabiduría que le caracteriza. ¡Pasen y disfruten!

“En el fondo, los científicos somos gente con suerte: podemos jugar a lo que queramos durante toda la vida”. (Lee Smolin)

Rosa M^a Cuenca
Coordinadora de la Revista Pasaje a la Ciencia

La Cueva de Nerja: un laboratorio natural para conocer los cambios climáticos pasados, presentes y futuros

Concepción Jiménez de Cisneros Vencelá

Investigadora del Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR),
Avd. de las Palmeras 4, 18100 Armilla (Granada)

El clima es un sistema complejo inherente a cualquier cuerpo planetario, resultado de la interacción de diversos procesos que ocasionan su alta variabilidad y que hacen que su comportamiento sea difícil de predecir. Desde hace décadas la ciencia se ha interesado por conocer y estudiar los cambios climáticos que han ido aconteciendo a lo largo de la historia de nuestro planeta, y ha surgido un interés especial en aquéllos sucedidos durante el Cuaternario por su impacto y relación con la aparición, desarrollo y actividad de la especie humana. Se conocen multitud de evidencias científicas que sugieren que los cambios climáticos en el pasado afectaron a la evolución de las distintas civilizaciones que se han sucedido en el planeta.

Muchas de las cuestiones que se plantean en relación con el cambio climático actual solamente se pueden responder mediante un mejor conocimiento del clima pasado. La investigación de los cambios climáticos del pasado, la paleoclimatología, es una disciplina científica que estudia cómo y en qué medida ha cambiado el clima en la Tierra a través del tiempo. Su objetivo es encontrar las razones por las cuales el clima varía e identificar factores que ayuden a predecir cómo cambiará en un futuro y de qué manera puede afectar la vida en la Tierra.

El estudio de la variabilidad del clima en el pasado reciente –últimos miles o decenas de miles de años– se ha convertido en una prioridad en la comunidad científica dado el papel clave que desempeña en el conocimiento de los mecanismos y procesos de los cambios climáticos actuales y futuros. En las últimas décadas han surgido diferentes teorías que tratan de explicar los orígenes de los cambios climáticos sufridos por la Tierra, algunos de los cuales ocurrieron con lentitud mientras otros lo hicieron de manera abrupta. Una hipótesis basada en los conocimientos astronómicos asocia tales fluctuaciones con las variaciones de la órbita terrestre, mientras otras los relacionan con los cambios en la actividad del Sol. También existen recientes evidencias que vinculan el impacto de meteoritos, el vulcanismo y las variaciones en la composición atmosférica con los cambios globales en el pasado. La acción irracional del hombre se ha unido a los factores “naturales” mencionados.

Los registros más comúnmente utilizados para las reconstrucciones paleoclimáticas se obtienen principalmente de sondeos de origen marino y glacial, bien de sedimentos de

los fondos oceánicos o bien de los testigos de hielo procedentes de Groenlandia o la Antártida. Obtener un registro equiparable en zonas continentales tiene mayor complejidad debido a que los depósitos que contienen la información paleoclimática son generalmente poco extensos y presentan una mayor dificultad a la hora de ser datados de manera absoluta. Una de las principales herramientas para realizar estudios del clima en el pasado son las formaciones minerales que se depositan en cuevas y que son conocidas como espeleotemas: “estalactitas y estalagmitas”.

1. LOS ESPELEOTEMAS (ESTALACTITAS Y ESTALAGMITAS)

Las cuevas son entornos únicos, ya que mantienen una temperatura constante, lo que las convierte en una excelente fuente de información sobre los cambios climáticos a largo plazo (Fairchild *et al.*, 2007).



Figura 1. Fotografía de la Cueva de Nerja. Sala de la Cascada.

El primer paso en la formación del karst es la disolución de una roca (Fig. 1), generalmente carbonatada, debido al paso de aguas meteóricas, combinadas con el dióxido de carbono procedente de la descomposición de la cobertura vegetal (Fairchild y Treble, 2009). La precipitación de los minerales acumulados por el agua durante su recorrido se produce al llegar al interior de una cavidad donde, debido a la sobresaturación del agua en un compuesto concreto y a las reacciones de desgasificación del CO_2 , se forman los espeleotemas (Fairchild y Treble, 2009; Frisia y Borsato, 2010; Fairchild y Baker, 2012). De la misma forma que en los árboles el patrón de crecimiento de los anillos revela datos sobre la edad y los acontecimientos que estos seres han experimentado a lo largo de su vida, estas estructuras minerales “los espeleotemas” formadas durante miles de años por el lento goteo de agua de la roca porosa (Fig. 2), presentan láminas de crecimiento que encierran información sobre distintos aspectos atmosféricos a lo largo del tiempo. Se las considera “testigos mudos” de los cambios climáticos ocurridos en la Tierra durante su

formación. Nos hablan de tiempos fríos, glaciares y tormentas, pero también de épocas cálidas y tropicales. Además, también ofrecen información de otros seres humanos con los que convivieron hace miles de años y que dejaron su huella en ellas.

El crecimiento de los espeleotemas se relaciona, con momentos de temperaturas medias relativamente altas que favorecen el desarrollo de una cobertura vegetal activa y, por tanto, concentraciones elevadas de CO_2 en el suelo, y con una recarga de agua significativa que drene el suelo y se infiltre en el macizo kárstico (Fairchild y Treble, 2009). Una evidencia visible de este hecho, es que cuando el espeleotema detiene su crecimiento su superficie adquiere un color más oscuro y evidencias de erosión. Así podemos inferir que poco crecimiento (grosor y longitud) de los espeleotemas se debe, entre otros factores, a periodos de sequía, poca precipitación o altas temperaturas que evitaron la circulación de agua en la cueva.



Figura 2. Goteo del agua de infiltración en la Cueva de Nerja.

La morfología de los espeleotemas está controlada básicamente por varios mecanismos hídricos que son: el agua de goteo, agua de flujo, aguas de inundación, geiser, procesos de capilaridad, procesos de condensación, aerosol, agua freática y el vapor (este caso es más raro). El principal factor que afecta el crecimiento de los espeleotemas es la cantidad de agua que se filtra en la cueva (Fairchild y Treble, 2009). En general, se constata que en el proceso de formación de un espeleotema es frecuente que intervenga más de un solo mecanismo de los que se han mencionado anteriormente. Por otro lado, otro aspecto importante a considerar en la formación de estas estructuras son las corrientes de aire existentes en la cueva causantes en gran medida de las distintas formas que pueden observarse.

Las estalactitas y las estalagmitas son las formas más comunes y familiares observadas en las cuevas. Las primeras se caracterizan por su forma cónica, similar a la de un

carámbano de hielo y son las que cuelgan del techo de las cuevas. Su tamaño es muy variable. Tienen un canal central, una capa tubular delgada de cristales alrededor del canal dispuestos longitudinalmente a éste y capas axiales al tubo central compuestas por un mosaico de cristales que crecen perpendicularmente al tubo. Las estalagmitas son los espeleotemas que se encuentran en el suelo de las cuevas, y cuya génesis va ligada al goteo de agua desde el techo o desde una estalactita de la cavidad, cuando la gota choca con el suelo, el CO_2 se va a la atmósfera de la cueva y se produce la precipitación del carbonato cálcico disuelto en el agua sobre el suelo de la gruta. En general son de mayor diámetro que las estalactitas y suelen tener la punta redondeada. No poseen un canal central y están formadas por capas de cristales alargados que se orientan perpendicularmente a la superficie de crecimiento del espeleotema. La forma y tamaño de las estalagmitas depende de muchos factores: distancia al punto de goteo, caudal de goteo, cantidad de bicarbonato en solución... Por ejemplo, si el goteo es muy rápido, el depósito se produce a los lados de la estalagmita y ésta aumenta en anchura. Si el goteo es muy lento, la mayoría del carbonato se deposita en el ápice y se forma una estalagmita alta y delgada. El diámetro de la estalagmita también depende de la distancia al punto de goteo: cuanto más lejos esté el goteo, más salpicará la gota al caer y mayor diámetro tendrá la estalagmita resultante. Una estalagmita con diámetro uniforme es reflejo de la constancia del goteo a lo largo del tiempo. Cuando se produce la unión de una estalagmita con una estalactita se forma una columna.

Los espeleotemas muestran una gama de tonalidades que está relacionada por la presencia de diversas sustancias húmicas (procedentes de la descomposición de la materia orgánica del suelo), por metales de transición (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} estos iones sustituyen al Ca^{2+} en la estructura de la calcita o del aragonito), y por pigmentos inorgánicos (óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso). En general, la calcita, el aragonito o el yeso son los minerales que los componen, los cuales son incoloros. Sin embargo, los espeleotemas de calcita exhiben un amplio rango de color, desde blanco-crema a amarillo, naranja, canela, marrón chocolate e incluso rojo. Las formaciones de aragonito y de yeso suelen ser traslúcidas, transparentes o de color blanco.

El estudio de los isótopos de carbono y oxígeno que se van almacenando en el interior de las estalagmitas y estalactitas durante su formación hace posible conocer con precisión las condiciones de humedad y temperatura que reinaban en la zona en un determinado momento del pasado. El contenido de isótopos de oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) en los espeleotemas depende de la temperatura de la cueva y de la composición isotópica del agua de goteo (Lachniet, 2009). A su vez, ésta se encuentra relacionada con la composición isotópica del agua de lluvia que, tras infiltrarse, alimenta el goteo (McDermott, 2004). Los valores finales del $\delta^{18}\text{O}$ en los espeleotemas además están influenciados por los procesos ambientales en el océano, la atmósfera, el suelo edáfico y el propio sistema de cuevas, de manera que su interpretación dependerá del conocimiento que se tenga de la relación entre los valores de $\delta^{18}\text{O}$ del agua de goteo y los valores de $\delta^{18}\text{O}$ de la calcita que forma la estalactita o estalagmita (Feng et al., 2012). Así la mayor o menor presencia del isótopo ^{18}O está bastante relacionada con el ciclo hidrológico y los cambios de temperatura del aire indicando más o menos humedad en la cueva durante el momento de la formación de espeleotemas. Los

valores de $\delta^{13}\text{C}$ están más ligados al tipo y densidad de vegetación desarrollada sobre la cueva y a varios procesos que tienen lugar en el suelo en relación con el CO_2 (ej: cantidad de carbono inorgánico presente en el suelo o roca, producción de CO_2 por fotosíntesis, desgasificación de CO_2 por precipitación del carbonato). El uso de ambos indicadores ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) resulta muy útil para conseguir estimaciones acerca de la composición de las paleoprecipitaciones, las condiciones físico-químicas del suelo, la tasa de humedad o el tipo de cobertura vegetal (plantas C3/plantas C4) presente por encima de la cueva (Baldini et al., 2008). Un aspecto de gran interés de estos materiales es la posibilidad de conocer su edad de formación. Para ello se usan técnicas de datación absoluta que permiten identificar así la relación de los eventos climáticos en el tiempo geológico. Estas dataciones se realizan mediante el método $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, puesto que a partir de la precipitación de la calcita comienza la desintegración radiactiva del uranio que ocasiona la formación de torio, el isótopo hijo, cuya proporción irá aumentando conforme pase el tiempo.

La gran ventaja que aporta el estudio de estos materiales, es que su formación está directamente controlada por las oscilaciones climáticas, de manera que se puede establecer una estrecha relación entre las etapas de crecimiento de las estalactitas y estalagmitas (Figura 3) y los episodios climáticos (Atkinson et al., 1978; Henning et al., 1983; Gordon et al., 1989).

Cada cueva responde de manera diferente al clima exterior lo que hace necesario identificar, a través de la monitorización de variables ambientales y de la hidrología actual, cuáles son los factores que condicionan la composición isotópica y geoquímica de los espeleotemas. Obtener esos datos a escala local es fundamental para conocer qué variables son más importantes en cada cueva de cara a la interpretación posterior de datos paleoclimáticos (Fairchild et al., 2000; Turrero et al., 2004, 2007, 2009; Cruz et al., 2005; Baldini et al., 2008; Baker et al., 2007; Matthey et al., 2008; Jiménez de Cisneros et al., 2021).



Figura 3. Estalagmita de la Cueva de Nerja. Corte transversal que muestra las etapas de crecimiento.

2. LA CUEVA DE NERJA

La Cueva de Nerja se ubica en el extremo suroriental de la provincia de Málaga, a 3 km al Este del pueblo de Nerja, junto a la localidad de Maro (Figura 4A). Tanto la cueva como su entorno se encuentran dentro de la región climática mediterránea, presentando una distribución pluviométrica irregular, definida por un periodo seco y cálido, coincidente con los meses de verano y una estación más lluviosa con mínimos térmicos durante el periodo comprendido entre octubre y enero. La temperatura de la cueva permanece prácticamente constante a lo largo del año siendo de 19 °C, y una humedad relativa del 90-100%. Variaciones en la concentración de CO₂ en la cueva han sido constatadas, con valores más altos que corresponden a la parte más interna de la cueva, y un aumento de la ventilación durante los meses de invierno (Pedrera et al., 2016).

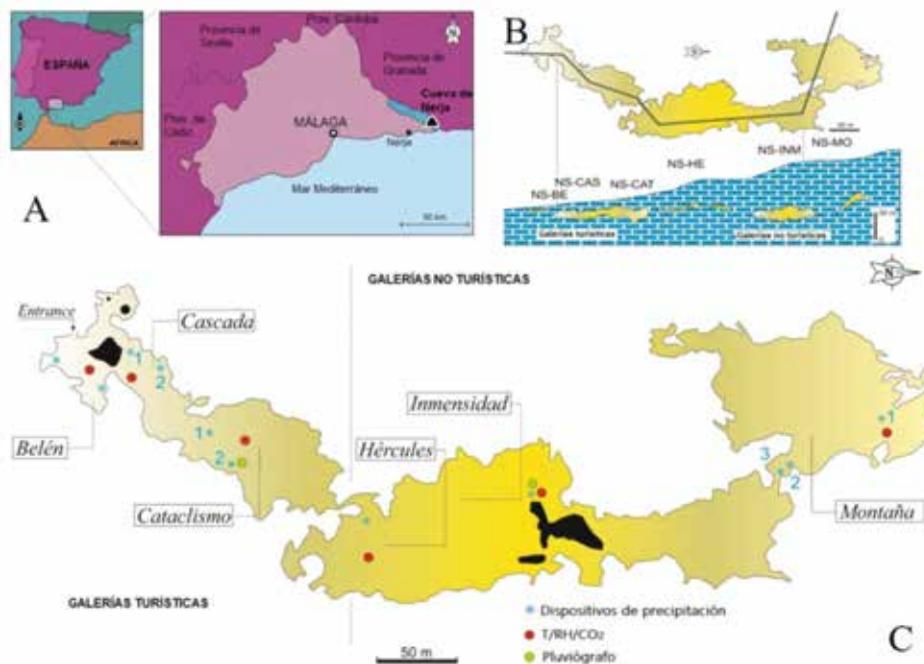


Figura 4. A. Localización geográfica de la Cueva de Nerja. B. Esquema de la Cueva de Nerja: vista en planta y perfil de la Cueva de Nerja. C. Localización de los dispositivos de precipitación en la cueva y de los equipos para la monitorización ambiental (Temperatura, Humedad relativa y CO₂).

La región se encuentra situada en la Zona Interna de la Cordillera Bética, cadena de plegamiento alpino que ocupa la zona meridional de la Península Ibérica. En mármoles dolomíticos, muy recrystalizados, y atribuidos, por criterios de geología regional, al Trías Medio se localiza la Cueva de Nerja. Estos mármoles presentan un tamaño de grano medio-grueso, de color blanco, generalmente muy triturados. La composición mineralógica de estos mármoles es, mayoritariamente, dolomita y calcita con proporciones menores de cuarzo, micas y silicatos cálcicos (Sanz de Galdeano, 1986; 1990; Andreo et al., 1993).

La Cueva de Nerja constituye un laboratorio natural de gran importancia donde es posible conocer e identificar los precipitados que actualmente se están formando en la

cueva. Mediante un seguimiento instrumental de diferentes variables ambientales (temperatura, humedad relativa, conductividad del agua, CO_2 del aire) se pueden establecer relaciones entre la composición del agua de lluvia, la del agua de goteo y la del carbonato precipitado en la actualidad (Liñán et al., 2008; Liñán et al., 2018). Estos resultados ayudan a conocer la dinámica de crecimiento actual de estos materiales, y a interpretar mejor las condiciones ambientales reinantes en épocas pasadas durante la formación de los espeleotemas antiguos (Figura 4B y C).

En la Cueva de Nerja se realizan experimentos de precipitación “in situ” utilizando para ello soportes artificiales de vidrio que se sitúan en áreas estratégicas de la cavidad (Jiménez de Cisneros et al., 2018; 2021). En estas áreas se hacen medidas de las variables ambientales como temperatura, humedad relativa y del CO_2 del aire, mediante equipos de instrumentación (Figura 5). En el exterior de la cueva, una estación meteorológica registra los valores de temperatura del aire y la cantidad de precipitación y se estudia el suelo externo de la cueva. En cada punto de estudio se recupera el carbonato precipitado, el agua de goteo y el agua de lluvia, y se controlan los valores de pH, conductividad eléctrica (CE), temperatura y humedad y concentración de CO_2 en la atmósfera de la cueva.



Figura 5. Experimentos de precipitación “in situ” en la Cueva de Nerja.

El análisis de los precipitados muestra que fundamentalmente su composición es de carbonato cálcico apareciendo los minerales de aragonito y calcita. El estudio mediante microscopía de barrido de alta resolución de estos cristales permite observar que tienen morfologías romboédricas, con caras planas bien definidas los cristales de calcita, y que en algunos casos están acompañados por microorganismos. Los cristales de aragonito tienen morfologías y hábitos fibrosos (Figura 6).

La cantidad de precipitado recogido está controlada fundamentalmente por el periodo estacional en que se desarrollan y por la mayor disponibilidad de agua. Al inicio de la precipitación ésta ocurre muy lentamente, y hasta que no se crea un núcleo de cristalización no comienza a ser efectiva. Durante los meses de primavera-verano, el aire tiene mayor

temperatura, mayor humedad relativa y mayor concentración de CO_2 que durante el otoño-invierno. La precipitación carbonatada se favorece durante el período otoño-invierno, como consecuencia de la menor presión parcial de CO_2 de la atmósfera subterránea, que determinaría una menor $p\text{CO}_2$ del agua de goteo y de la mayor ventilación de la cavidad, que favorecería los procesos de evaporación del agua de goteo. Durante el periodo estacional más seco (primavera-verano) la mayor concentración de CO_2 en la atmósfera de la cavidad, la mayor humedad ambiental y la menor ventilación de las salas se traduce en una baja tasa de precipitación de carbonatos en este sector de la cueva. Los datos isotópicos obtenidos de los precipitados de carbonato y el agua por goteo muestran valores más ligeros de $\delta^{18}\text{O}$ durante todo el proceso, desde el momento en que el agua de lluvia llega al suelo, se infiltra en el sustrato geológico y se desgasifica cuando entra en la cueva, con la consiguiente precipitación de carbonatos. Se ha observado una relación inversa significativa entre los valores de $\delta^{13}\text{C}$ y las tasas de goteo de agua, lo que sugiere que, además del contenido orgánico de C, otras variables, como las características texturales de la roca madre, pueden contribuir a valores de $\delta^{13}\text{C}$ más negativos.

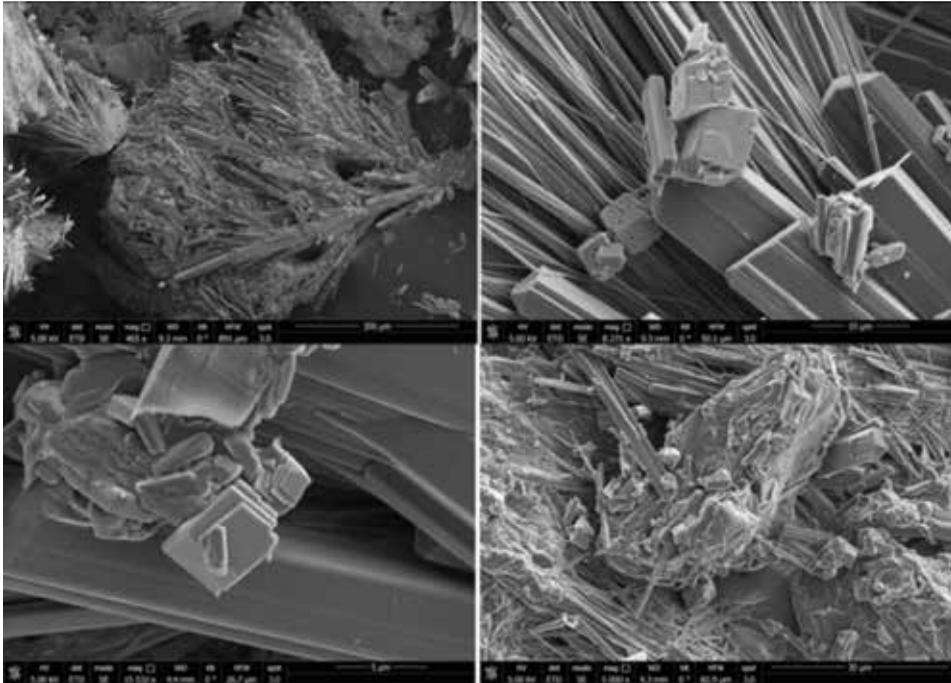


Figura 6. Imágenes obtenidas mediante HRSEM de los precipitados carbonatados obtenidos en los dispositivos ubicados en la Cueva de Nerja.

Los resultados que se obtienen en los trabajos que se realizan en este peculiar laboratorio natural constituyen una herramienta de gran importancia para conocer el futuro sobre la evolución de la cueva, así como para obtener información sobre los cambios climáticos pasados que quedan reflejados en los espeleotemas antiguos.

Agradecimientos: a la Fundación Cueva de Nerja por la disponibilidad de todos los recursos para llevar a cabo las investigaciones “Espeleotemas y registros arqueológicos de la Cueva de Nerja como indicadores del cambios paleoclimático y paleoambiental” y al Proyecto PID2021-125619OB-C22.

REFERENCIAS

- Andreo, B., Carrasco, F., Sanz de Galdeano, C., 1993. Estudio geológico del entorno de la Cueva de Nerja. En: *Geología de la Cueva de Nerja. Trabajos sobre la Cueva de Nerja*, tomo III, (F. Carrasco, Ed). Patronato de la Cueva de Nerja, Málaga, 25-50.
- Atkinson, T.C., Harmon, R.S., Smart, P.L., Waltham, A.M., 1978. Paleoclimatic and geomorphic implications of $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ dates on speleothems from Britain. *Nature*, 272: 24-28.
- Baker, A., Asrat, A., Fairchild, I. J., Leng, M. J., Wynn, P. M., Bryant, C., Genty, D., Baldini, J.U.L., McDermott, F., Hoffman, D.L., Richards, D.A., Clipson, N., 2008. Very-high-frequency and seasonal cave atmosphere pCO_2 variability: Implications for stalagmite growth and oxygen isotope-based paleoclimate records. *Earth and Planetary Science Letters*, 272: 118-129.
- Cruz, F.W., Karmann, I., Viana, Jr., O., Burns, S. J., Ferrari, J.A., Vuille, M., Moreira, M. Z., y Sial, A. N., 2005. Stable isotope study of cave percolation waters in subtropical Brazil: implications for paleoclimate inferences from speleothems. *Chemical Geology*, 220: 245-262.
- Fairchild, I.J., Borsato, A., Tooth, A.F., Frisia, S., Hawkesworth, D.J., Huang, Y., McDermott, F., Spiro, B., 2000. Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothems climatic records. *Chemical Geology*, 166: 255-269.
- Fairchild, I.J., Frisia, S., Borsato, A., Tooth, A., 2007. Speleothems. En: *Geochemical Sediments and Landscapes* (D.J. Nash, S.J. McLaren, Ed). Blackwell Publishing, Oxford, 200-245. 31
- Fairchild, I.J., Treble, P.C., 2009. Trace elements in speleothems as recorders of environmental change. *Quaternary Science Reviews*, 28: 449-468.
- Fairchild, I.J., Baker, A., 2012. Introduction to speleothems and systems. En: *Speleothem Science: From Process to Past Environments* (I.J. Fairchild, A. Baker, Ed) Blackwell Publishing Ltd., 3-27.
- Feng, W., Banner, J.L., Guilfoyle, A.L., Musgrove, M., James, E.W., 2012. Oxygen isotopic fractionation between drip water and speleothem calcite: A 10-year monitoring study, central Texas, USA. *Chemical Geology*, 304-305: 53-67.
- Frisia, S., Borsato, A., 2010. Karst. En: Alonso-Zarza, A.M., Tanner, L.H. (Eds). *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments, and Processes. Developments in Sedimentology*, 6: 393 p.
- Gordon, D., Smart, P.L., Ford, D.C., Andrews, J.N., Atkinson, T.C., Rowe, P., Christopher, N.S.J., 1989. Dating of late Pleistocene Interglacial and Interstadial periods in the United Kingdom from speleothems growth frequency. *Quaternary Research*, 31: 14-26.
- Henning, G.J., Grün, R., Brunnacker, K., 1983. Speleothems, Travertines and Paleoclimates. *Quaternary Research*, 20: 1-29.
- Jiménez de Cisneros, C., Liñán Baena, C., Peña Heras, A. y Caballero, E., 2018. Dinámica espeleotémica actual en la Cueva de Nerja (Málaga, España). En: P.A. Robledo y J.J. Durán (Eds.), *Cuevas: la flecha del tiempo, de la prehistoria a la actualidad*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas, pp. 29-42.

- Jiménez de Cisneros, C., A. Peña, A., Caballero, E. and Liñán Baena, C. 2021. A multiparametric approach for evaluating the current carbonate precipitation and external soil of Nerja Cave (Málaga, Spain). *International Journal of Environmental Research* <https://doi.org/10.1007/s41742-020-00278-x>.
- Lachniet, M. S., 2009. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. *Quaternary Science Reviews*, 28 (5-6): 412-432. 33
- Liñán, C., Carrasco, F., Calaforra, J.M., del Rosal, Y., Garrido, A., Vadillo, I., 2008. Control de parámetros ambientales en las galerías altas y nuevas de la Cueva de Nerja (Málaga). Resultados preliminares. En: *Resúmenes del II Congreso Español sobre Cuevas Turísticas* (J.J. Durán, J. López-Martínez, Ed). Santander, Cantabria, 41-42
- Liñán, C., del Rosal, Y., Carrasco, F., Vadillo, I., Benavente, J., Ojeda, L., 2018. Highlighting the importance of transitional ventilation regimes in the management of Mediterranean show caves (Nerja-Pintada system, southern Spain). *Science of the Total Environment*, 631-632, 1268-1278.
- Mattey, D., Lowry, D., Duffet, J., Fisher, R. Hodge, E., Frisia, S., 2008. A 53 year seasonally resolved oxygen and carbon isotope record from a modern Gibraltar speleothem: reconstructed drip water and relationship to local precipitation. *Earth and Planetary Science Letters*, 269 (1-2): 80-95.
- McDermott, F., 2004. Paleoclimate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Reviews*, 23: 901-918.
- Pedraza, A., Mérida Rodríguez, M., Reyes Corredera, S., Liñán Baena, C., Carrasco, F., Jorda, J.F., Aura Tortosa, J.E., 2016. Cueva de Nerja y Litoral Oriental de Málaga. Excursiones de la XIV Reunión Nacional de Geomorfología. Sociedad Española de Geomorfología. Instituto Geológico y Minero de España. Universidad de Málaga. Fundación Cueva de Nerja, 55p.
- Sanz de Galdeano, C., 1986. Structure et stratigraphie du secteur oriental de la Sierra Almajara (Zone Alpujarride, Cordilleres Bétiques). *Estudios Geológicos*, 42: 281-289.
- Sanz de Galdeano, C., 1990. Estructura y estratigrafía de la Sierra de los Guájares y sectores próximos (conjunto Alpujarride, Cordilleras Béticas). *Estudios Geológicos*, 46 (1-2): 123-134.
- Turrero, M.J., Garralón, A., Martín-Chivelet, J., Gómez, P., Sánchez, L., Quejido, A., Martín-Merino, M.A., Ortega, A.L., 2004. Seasonal changes in the chemistry of drip waters in Kaite Cave (N Spain). En: *Water-Rock Interaction II Wanty* (R.B., Seal II, R.S. Ed). Balkema Publishers, London, 1407-1410.
- Turrero, M.J., Garralón, A., Gómez, P., Sánchez, L., Martín-Chivelet, J., Ortega, A.I., 2007. Geochemical evolution of drip-water and present-growing calcite at Kaite cave (N Spain). *Water-Rock Interaction*, 12: 1187-1190.
- Turrero, M.J., Garralón Lafuente, A., Gómez González, P., Martín Chivelet, J., Sánchez Moreno, L., Ortega Martínez, A.I., 2009. Present-day calcite deposition in two caves of N Spain (Kaite and Cueva Mayor): Factors affecting calcite growth and fabric. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73 (13): A1356-A1356.

Enseñanza de la geología. Tendencias recientes

Enrique García de la Torre

IES El Tablero. Córdoba.

Resumen

La enseñanza de la geología es necesaria por diferentes razones. Por otro lado se deben de priorizar aquellos contenidos geológicos de la mano de los expertos de máximo nivel y se deben de repartir adecuadamente a lo largo de las diferentes etapas educativas. Hay, además, un consenso generalizado en relacionar estos aprendizajes con la vida cotidiana e incluir un amplio abanico de actividades de aprendizaje en el aula, laboratorio y en la naturaleza. Se destaca la importancia del estudio de las diferentes estructuras geológicas y la de una enseñanza inclusiva de esta ciencia.

Abstract:

The teaching of geology is necessary for different reasons. On the other hand, those geological contents should be prioritized by top-level experts and should be adequately distributed throughout the different educational stages. There is a general consensus in relating this learning to everyday life, including a wide range of learning activities in the classroom, laboratory and in nature. The importance of the study of the different geological structures and that of an inclusive teaching of this science is highlighted.

Palabras clave: enseñanza de la geología, contenidos, actividades de aprendizaje, estructuras geológicas, enseñanza inclusiva.

Key words: teaching of geology, content, learning activities, geological structures, inclusive teaching.

POR QUÉ HAY QUE APRENDER GEOLOGÍA

En Febrero de 2008 se celebraba en París el acto inaugural del “Año Internacional Planeta Tierra” y en su presentación en la UNESCO declaraba que “todas las decisiones sobre la sostenibilidad deberían estar fundamentadas en la riqueza del conocimiento, existente y futuro, proporcionado por las ciencias de la Tierra.

Se necesita la Geología para elaborar cualquier propuesta de sostenibilidad convenientemente fundada. Parece que está claro que no podríamos entender el presente sin conocer el pasado. No podríamos, sin duda, entender el cambio climático actual sin conocer lo ocurrido en cambios climáticos anteriores. Necesitamos la geología porque, cada año, fenómenos naturales como terremotos, volcanes o inundaciones generan decenas de miles de víctimas mortales que, en su mayoría, se evitarían con un mejor conocimiento del funcionamiento del planeta. Y, en última instancia, la necesitamos para conocer nuestro pasado y, por tanto, para conocernos mejor a nosotros mismos.

Como ciudadanos necesitamos conocer, además, aquella geología que nos ayude a entender cómo funciona la Tierra y a asentar este conocimiento en situaciones reales, relacionándola con los problemas de la sociedad, que nos facilite entender cómo se va elaborando el conocimiento científico y proporcione conocimientos prácticos útiles para determinadas situaciones cotidianas.

QUÉ GEOLOGÍA ENSEÑAR

Consideramos que la propuesta más fundamentada al respecto se produjo en 2011, cuando Pedrinaci coordinó una reunión con representantes de las principales sociedades científicas y organizaciones españolas relacionadas con la geología y su enseñanza (universidades, colegio de geólogos, instituto geológico y minero de España, asociación española para la enseñanza de las ciencias de la Tierra) en la que consensuaron diez ideas clave acerca del funcionamiento de la tierra:

1. La Tierra es un sistema complejo en el que interaccionan las rocas, el agua, el aire y la vida.
2. El origen de la Tierra va unido al del sistema solar y su larga historia está registrada en los materiales que la componen.
3. Los materiales de la Tierra se originan y modifican de manera continua.
4. El agua y el aire hacen de la Tierra un planeta especial.
5. La vida evoluciona e interacciona con la Tierra modificándose continuamente.
6. La tectónica de placas es una teoría global e integradora de la Tierra.
7. Los procesos geológicos externos transforman la superficie terrestre.
8. La humanidad depende del planeta Tierra para la obtención de sus recursos y debe hacerlo de forma sostenible.
9. Algunos procesos naturales implican riesgos para la humanidad.
10. Los científicos interpretan y explican el funcionamiento de la Tierra basándose en observaciones repetibles y en ideas verificables.

El lector podrá comprobar pronto si estos contenidos se reflejan en los currículos de geología de los reales decretos y decretos autonómicos que desarrollan la LOMLOE (2020) y que establecerán las enseñanzas en primaria, ESO y el bachillerato.

En este sentido Cortés (2020) propone tomar como referencia la teoría de la tectónica de placas como articuladora de los contenidos de geología así como la distribución de contenidos siguiente:

- Educación primaria: descripción de hechos y fenómenos observables (ej. La superficie de la Tierra tiene zonas montañosas y zonas llanas).
- 1º y 3º de ESO: descripciones cualitativas y generalizaciones sencillas (ej. Las rocas de la superficie están a menudo plegadas y fracturadas).
- 4º de ESO: descripciones cualitativas y cuantitativas, generalizaciones complejas y conexión entre hechos observables y procesos (ej. La litosfera está dividida en placas que se han desplazado a lo largo de la historia de la Tierra).

- Bachillerato: descripción e interpretación de fenómenos complejos que precisan de conocimientos previos de física, química y biología (ej. El flujo térmico desde el interior de la Tierra hacia la superficie y la estructura interna del planeta han condicionado la dinámica terrestre: procesos de convección, generación del campo magnético y movimiento de las placas).

CÓMO APRENDER GEOLOGÍA

Existe un amplio consenso internacional sobre algunas recomendaciones metodológicas que pueden resultar útiles para la enseñanza de la Geología y por ende de las ciencias de la Tierra:

- Deben establecerse relaciones explícitas entre los contenidos trabajados y situaciones de la vida cotidiana. Así, puede hacerse a partir de un problema real (como el terremoto de Lorca, la apertura de una cantera cercana, las inundaciones de Jerez o la erupción volcánica de La Palma hace unos meses). De esta forma se da entrada al conocimiento científico en el momento y en la medida que la situación lo demanda y que este conocimiento ha sido generado para entender lo que ocurre a nuestro alrededor.

- Conviene incluir algunas investigaciones escolares o indagaciones (Caamaño, 2012) en las unidades didácticas de Geología que componen las programaciones escolares. Tratar, en ocasiones, el aprendizaje de la geología como un problema científico o pregunta clave. Ante las respuestas iniciales de los alumnos (hipótesis) se trata de contrastarlas en el laboratorio y llegar a conclusiones coherentes con el conocimiento científico.

- Debe ofrecerse un abanico muy variado de actividades, tanto por su temática como por los procedimientos que se ponen en juego. Así por ejemplo, actividades de aula que requieren la búsqueda y tratamiento de la información, la resolución de problemas, la argumentación y el uso de evidencias, el manejo de mapas topográficos, de cortes geológicos...; actividades de laboratorio de identificación de rocas, minerales y fósiles...; actividades de campo que supongan aplicación de los conocimientos adquiridos en el aula y en laboratorio y ayuden a contextualizarlos en el medio natural.

Por interesante que sea, cualquier actividad repetida sistemáticamente deviene en rutina. La diversidad, por el contrario, favorece la motivación, atiende mejor a la diversidad de los estudiantes con intereses y ritmos diferentes y proporciona una formación mas completa.

ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS PRIMARIAS Y SU POTENCIAL EDUCATIVO

El término “estructura geológica” se refiere en principio a la geometría presente en las rocas y a la disposición de las mismas, independientemente de su origen. De esta forma, podemos encontrar estructuras primarias, relacionadas con los procesos de su formación y emplazamiento, como el magmatismo intrusivo o extrusivo, en el caso de las rocas ígneas; o la sedimentación, la estratificación o las bioconstrucciones en el caso de las rocas

sedimentarias. También podemos encontrar estructuras secundarias que corresponden a las deformaciones que corresponden a cualquier tipo de rocas, incluyendo pliegues, fracturas y foliaciones (FOSSSEN, 2016).

García Hoyo (2021) nos recomienda viajar real o virtualmente al Cabo de Gata para aprovechar el potencial didáctico que tiene el Geoparque allí ubicado para analizar los productos resultantes del vulcanismo. Después de elaborar un exhaustivo catálogo de estructuras volcánicas presentes en el parque y de otras que se encuentran sumergidas (disyunciones columnares, diques, depósitos hyaloclásticos, ignimbritas...) propone un conjunto de actividades que se desarrolla primero en el aula (donde se tratan conceptos generales sobre volcanes, estructuras volcánicas y riesgos geológicos) y luego en el campo, mediante la elaboración de un minicuaderno donde se identifican donde se dibujan las estructuras volcánicas presentes. Se termina con la historia geológica de la zona basada, en gran parte, en el análisis de dichas estructuras.

Pérez García y otros (2021) hacen un recorrido por algunas de las estructuras primarias que podemos encontrar en las rocas sedimentarias (estratificaciones y laminaciones cruzadas, ripples...) y tratan de que a partir de fotografías y o muestras de mano de las mismas los alumnos puedan interpretar y ubicar la dirección de las corrientes que las han originado e incluso ubicar donde estaba una playa en función de la situación de las muestras de estructuras estratégicamente situadas.

ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS SECUNDARIAS Y SU POTENCIAL EDUCATIVO

Recordemos que en zonas con estratificación horizontal y rocas alternantes más o menos resistentes a la erosión, las primeras quedan elevadas originando una meseta estructural. La erosión, especialmente en zonas áridas, de esta meseta hace retroceder la misma, fragmentándose en mesas, tacones y pináculos. En nuestro país este relieve se denomina relieve tabular y se han desarrollado especialmente en las depresiones interiores, - mares interiores o lagos - de la península. Cuando una secuencia inclinada de rocas resistentes estratificadas alternan con otras no resistentes, estas últimas forman valles alargados paralelos a los escarpes - cuestras, hogback o crestas, según su inclinación - que originan las primeras. Ambas alineaciones coinciden con la dirección de dichas capas.

Las fallas típicamente forman bloque hundidos denominados grabens, asociados a otros levantados denominados horts, que producen los escarpes de falla, con una traza mas o menos rectilínea – a veces curva – en la dirección del plano de falla. Los escarpes de las fallas están sometidos también a la erosión remontante producida por las aguas que pasan por ellas en un proceso alternativo en el que el escarpe a rebajar por la erosión queda a veces a la derecha y otras a la izquierda

En las regiones con estructuras plegadas suavemente - relieve jurásico - en las etapas iniciales de erosión los antiformes suelen formar riscos y lomas – denominados mont - y

los sinformes, valles – denominados val -. Es el relieve conforme. Progresivamente se van erosionando los monts, originando formas relieve cóncavas – denominadas combes -, por debajo de los sinclinales que van quedando en resalte, originando los sinclinales colgados, originando el relieve invertido. Otro tipo de relieve plegado, denominado relieve apalachiano, caracterizado por una sucesión de barras, de altitud moderada y relativamente homogénea separadas por franjas deprimidas o surcos de mayor o menor amplitud y altura bastante uniforme. Un tercer tipo de relieve plegado – alpino - se origina cuando la estructura predominante son los mantos de corrimiento. Aunque las formas de relieve pueden ser complejas generalmente se originan alineaciones de montañas y valles paralelas entre sí y a los frentes de cabalgamiento.

Pascual Trillo (2021) considera que el sistema Central es un lugar idóneo para la observación y estudio de estructuras de deformación de las rocas. Ha seleccionado algunos puntos en el contacto serrano madrileño con la cuenca cenozoica del Tajo para observar formas plegadas o fracturas ligadas a la formación alpina de esta cadena montañosa.

Buil Trigo (2021) recopila algunas de las actividades relacionadas con el patrimonio geológico de los alrededores del centro educativo de Binéfar (Huesca) donde desarrolla su labor docente. En ellos se pueden reconocer fantásticos ejemplos de estructuras primarias (laminaciones cruzadas, estructuras de corrientes y relieves tabulares derivados.) y secundarias (relieves en cuesta y pliegues).

GEOLOGÍA PARA TODOS

Como indican Fesharaki y otros (2020) es importante recordar que los estudiantes de todos los niveles de enseñanza tienen derecho a una educación inclusiva. Esto es especialmente importante en relación con la geología, dado que su presencia es escasa en la educación formal.

Illobre Jiménez y Belinchón García (2020), muestran cómo los museos se pueden adaptar a los retos actuales y facilitar las visitas y la enseñanza inclusivas. Como nos está enseñando la actual pandemia, las visitas virtuales a museos pueden ser un gran apoyo a la labor de enseñanza de las ciencias.

Alcalde-Fuentes y otros (2020) discuten los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta cuando se trabaja con alumnos y alumnas de altas capacidades, y se presenta una secuencia de seis actividades relacionadas con diversas ramas de la geología que permiten motivar y enseñar geología a alumnos de educación primaria.

Por otra parte, López-Acevedo y otros (2020) explican cómo utilizar un método didáctico inclusivo para el reconocimiento táctil de minerales, rocas y fósiles, principalmente desde experiencias con personas con ceguera.

Del mismo Montesinos del Valle y otras (2020) enumeran diferentes aspectos a tener en cuenta en la enseñanza a personas sordociegas a través de tres talleres: la historia de

la vida en la Tierra, la deriva continental y su relación con las orogenias y los procesos sísmicos, y finalmente, las consecuencias que tienen los cambios climáticos sobre el nivel del mar, centrando la actividad en el calentamiento global y la consiguiente subida del nivel del mar.

NOTA.- Estos cinco últimos artículos se pueden descargar en <http://www.aepect.org/ect-vol-28-2-2020/>

BIBLIOGRAFÍA

- ALCALDE FUENTES, R., AUDIJE GIL, J., BERROCAL CASERO, M., OZKAYA DE JUANAS, S., PÉREZ VALERA, F. y PÉREZ VALERA, J. (2020) “Geología y altas capacidades intelectuales: despertando el pensamiento científico en el aula”. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*. Vol. 28,2. pp.176-188.
- BUIL TRIGO, M: “El patrimonio geológico en el aula”. *Alambique. Didáctica de las Ciencias experimentales*, núm 106, pp. 41-48.
- CAAMAÑO, A. (2012): “La investigación escolar es la actividad que mejor integra el aprendizaje de los diferentes procedimientos científicos”. *11 ideas clave, el desarrollo del conocimiento científico*. Barcelona. Graó, pp 127-146.
- CORTÉS, A.L. y MARTÍNEZ PEÑA, M. (2020): “Los retos del currículo de geología”. *Alambique. Didáctica de las Ciencias experimentales*, núm 100, pp. 41-49.
- FESHARAKI, O., GARCÍA FRANK, A. y GÓMEZ-HERAS (2020). “Geología para todas las personas”. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*. Vol. 28,2. pp.152-154.
- FOSSEN, H. (2016). “*Structural Geology*” 2ª edición. Cambridge. University Press.
- GARCÍA HOYO, G. (2021): “Estructuras volcánicas: Un acercamiento desde el Geoparque Mundial Unesco Cabo de Gata Níjar”. *Alambique. Didáctica de las Ciencias experimentales*, núm 106, pp. 10-18.
- ILLOBRE JIMÉNEZ, S. y BELINCHÓN GARCÍA, M. (2020). “Museos para los nuevos tiempos: la naturaleza desde diversos puntos de vista”. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*. Vol. 28,2. pp.167-175.
- LÓPEZ-ACEVEDO, V., PILÁN ASIÁN, M.D., ALCALDE FUENTES, M.R., LÓPEZ ANDRÉS, S., GOÑI, J. y CHICOTE, J.C. (2020). “Método didáctico inclusivo para el reconocimiento táctil de minerales, rocas y fósiles: diseño y claves pedagógicas”. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*. Vol. 28,2. pp. 189-198.
- MONTESINOS DEL VALLE, M., GARCÍA FRANK, A., GÓMEZ-HERAS, M. y GONZALO PARRA, L. (2020). “La geología al alcance de la mano: Un taller de divulgación de la geología para personas con sordoceguera”. *Enseñanza de las ciencias de la Tierra*. Vol. 28,2. pp. 213-221.
- PASCUAL TRILLO, J.A., (2021): “Fracturas y pliegues in situ. Deformaciones de interés didáctico en los límites madrileños del sistema central”. *Alambique. Didáctica de las Ciencias experimentales*, núm 106, pp. 18-25.
- PEDRINACI, E. (2016): “La Geología que necesitamos”. *Alambique. Didáctica de las Ciencias experimentales*, núm 83, pp. 4-7.
- PÉREZ GARCÍA, A., AURELL CARMONA, M., BÁDENAS LAGO, B. (2021): “Estructuras sedimentarias: La interpretación de ambientes y procesos del pasado”. *Alambique. Didáctica de las Ciencias experimentales*, núm 106, pp. 25-33.

Erupción de Cumbre Vieja en La Palma, Islas Canarias. Septiembre de 2021: una ventana a la investigación volcanológica

Jane H. Scarrow
Geóloga

1. ANTECEDENTES

Mi colaboración con el Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN) comenzó en el otoño de 2020 cuando contacté con el investigador Dr Matt Pankhurst para implicarle en la preparación de un proyecto de investigación ‘Estrategias avanzadas de anticipación y adaptación: vulcanismo en Iberia e Iberoamérica (SAAAVII)’ que trataba de estudiar las implicaciones geológicas y sociales de la reactivación de magmatismo subaéreo en las Islas Canarias, desafortunadamente la propuesta fue denegada, pero ha sido presentada de nuevo, modificada, en la convocatoria de 2021 (decisión pendiente). Antes de centrarnos en La Palma cabe mencionar que otra ramificación de la colaboración con INVOLCAN es la instalación reciente de un radar autónomo sensible-fase (diseñado originalmente para medir flujos de deshielo de glaciares de la Antártida) con una colaboración de compañeros del ‘British Antarctic Survey’ en el Teide, Tenerife - última erupción 1909 - para detectar cambios en el sistema hidrotermal somero del volcán.

Para entender cómo llegué a investigar esta erupción tan históricamente significativa, tenemos que retroceder algunos años. Soy investigadora de la Universidad de Granada (UGR), Departamento de Mineralogía y Petrología, desde 1999 y he trabajado en proyectos clave relacionados con los Montes Urales en Rusia y la Zona Ibérica Central hasta hace 5 años. En 2015 motivada por inquietudes a más largo plazo que comenzaron al ver los efectos de la crisis financiera de 2008, decidí cambiar la dirección de mi investigación para trabajar en sistemas magmáticos recientes y activos para contribuir en lo que pudiera a mejorar la resiliencia social de las comunidades que viven con volcanes.

En el año 2016, con la financiación de una beca Salvador de Madariaga (Ministerio de Universidades) y posteriormente de Marie Skłodowska-Curie (Comisión Europea) comencé un periodo de estancias en el extranjero. Las dos etapas fueron supervisadas por la Prof. Jenni Barclay en la Universidad de East Anglia, Reino Unido y me dieron la oportunidad de establecer algunas colaboraciones con colegas internacionales - Reino Unido, Alemania, Australia - expertos de nivel mundial en el campo de la volcanología. Además, realicé trabajos de campo en: Santorini, Grecia; la Isla Ascensión, Atlántico Sur; el Caribe, Montserrat (Fig. 1) y San Vicente; y América Central, Costa Rica.



Fig. 1 Soufrière Hills, Montserrat, Caribe.

Al regresar a la UGR en 2020 solicité y obtuve financiación del Fondo Europeo de Desarrollo Regional como investigadora principal para el estudio: Preparación y Resistencia a las Erupciones de los Volcanes Iberoamericanos (PREVIA) (Fig. 2). El proyecto se centra en el volcán Apoyeque, que está a tan solo 20 km de la capital nicaragüense Managua, que tiene una población de más de 1.000.000 habitantes. Aunque, actualmente latente, la última erupción conocida fue hace aproximadamente 2.000 años, las erupciones históricas de este centro fueron muy potentes y explosivas. Estos datos son relevantes si tenemos en cuenta que la definición de un volcán ‘activo’ es que ha entrado en erupción en los últimos 10.000 años (1). De hecho, un equipo interdisciplinar de la UGR - incluyendo investigadores de los campos de geología, geofísica, economía, derecho, urbanismo, psicología y educación - acaba de volver de una campaña de campo en Nicaragua en la que ha colaborando con el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), el Sistema y Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED), el Instituto de Geología y Geofísica de Nicaragua (IGG-CIGEO) de la Universidad de Nicaragua, Managua (UNAN), otros departamentos de la UNAN además de la Universidad de Medicina Oriental.



Fig. 2 El lago de lava del volcán de Masaya, Nicaragua.

2. ANTES DE LA ERUPCIÓN

Las Islas Canarias han sido de interés para la comunidad investigadora internacional durante mucho tiempo, una simple búsqueda en internet revela, que tan solo en los últimos 10 años, se han publicado más de 1.000 artículos sobre el volcanismo de las Islas Canarias (2). Estos estudios incluyen un trabajo premonitorio de Torres-González et al. (3) en el ‘Journal of Volcanology and Geothermal Research’ ‘Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands’ y el trabajo informativo de Longpre y Felpeto (4) ‘Historical volcanism in the Canary Islands; part 1: A review of precursory and eruptive activity, eruption parameter estimates, and implications for hazard assessment’.

El interés deriva de una combinación de la geología, localización y contexto socioeconómico del archipiélago volcánico español que se encuentra en el Océano Atlántico, 100 km al oeste del sur de Marruecos. Las ocho islas principales son, de oeste a este, El Hierro, La Palma, La Gomera, Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa (Fig. 3). Tienen una población combinada de más de unos 2 millones de habitantes, concentrada principalmente en dos grandes islas Tenerife 43% y Gran Canaria 40%, que se ve aumentada por el turismo, la principal industria, que atrae a más de 12 millones de visitantes al año. Cuatro de las siete islas han estado activas en tiempos históricos: Lanzarote (1824, previamente hubo un episodio más prolongado de 1730-1736), Tenerife (1909), El Hierro (2011) y La Palma (2021) (1).

La Palma, en concreto, ha experimentado varios episodios magmáticos: Complejo Basal (c. 4,0-3,0 millones de años (Ma)); volcanes Garafia, Taburiente, Cumbre Nueva y Bejenado (c. 1,7 Ma –490 mil años (ka)); y Cumbre Vieja (c. 125 ka-presente). Es el sistema volcánico canario más activo en tiempos históricos, con erupciones en c. 1480, 1585, 1646, 1677, 1712, 1949, 1971 y 2021 (1; 5; 6), lo que indica un período entre eventos de aproximadamente 230-20 años. Las erupciones históricas anteriores, a lo largo de la zona de ‘rift’ (extensión) con tendencia norte-sur de Cumbre Vieja, se han caracterizado por la aparición de múltiples bocas eruptivas alineadas oblicuamente al eje de la zona de ‘rift’. La actividad eruptiva ha sido típicamente explosiva en la(s) chimenea(s) de la cumbre y efusiva en la base y los flancos de los volcanes, con lavas que tienen una composición basáltica variablemente enriquecida en elementos álcali (7; 8; 9).

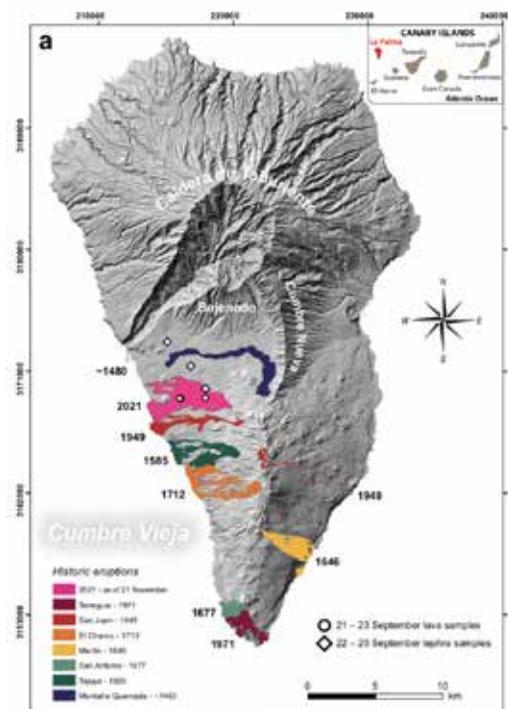


Fig. 3 Mapa de las erupciones históricas de La Palma (10).

INVOLCAN cuenta con un programa de monitoreo geoquímico de emisión difusa de gases en Cumbre Vieja desde 1997, y de monitoreo de la composición de aguas subterráneas desde 2017. Previa a la erupción reciente - en la ausencia de desgasificación visible como fumarolas y penachos - las medidas se enfocaban en la desgasificación difusa de CO₂, He-3 y H₂, en las que se habían detectado algunas anomalías (11). En la isla también se monitorizan los terremotos. Antes de la actividad del año pasado, desde 2017 se habían registrado diez enjambres sísmicos a 20-30 km de profundidad en La Palma. El 11 de septiembre de 2021, INVOLCAN y el Instituto Geográfico Nacional (IGN) detectó un enjambre sísmico relacionado con la intrusión de magma a 8-13 km de profundidad (1). En los siguientes 6 días, hasta el 17 de septiembre, había más de 22.000 sismos que aumentaron en intensidad hasta un máximo de MI 3,5, con hipocentros que se hicieron poco profundos a 8-10 km y migraron ligeramente hacia el oeste; durante el mismo período, la deformación máxima del suelo ascendió a 15 cm (1).

El 13 de septiembre se advirtió, con una alerta amarilla, a los municipios de Los Llanos de Aridane, Fuencaliente, El Paso y Villa de Mazo, de la posibilidad de una erupción volcánica. Por lo tanto, las autoridades evacuaron a alrededor de 40 personas discapacitadas además de ganadería (12). Después de una breve pausa (17-18 de septiembre), la sismicidad aumentó a principios del 19 de septiembre a profundidades de 0-6 km con terremotos de hasta MI 4,2 coincidiendo con un aumento de la deformación vertical.

A última hora de la tarde del sábado 18, INVOLCAN había tomado la decisión de desplegar un ‘equipo de petrología’ en La Palma además de los sismólogos y químicos de gas que ya se encontraban en la isla. NB. La petrología es el estudio de las rocas desde el punto de vista de su composición, mineralógica y química, y su formación. La ciencia estaba en marcha, la gente se estaba preparando y los colaboradores estaban en ‘standby’...

3. LA ERUPCIÓN

A las 14:13h del 19 de septiembre de 2021, el volcán Cumbre Vieja (Fig. 3) entró en erupción tras 50 años de reposo. El acontecimiento ocurrió en Cabeza de Vaca, en el municipio de El Paso, aproximadamente 2 km al noroeste de los focos eruptivos de San Juan de 1949 (Fig. 4). El nivel de alerta subió a naranja y después rápidamente a rojo. Evacuaron a unas 300 personas de la región inmediatamente y 700 más, incluyendo a turistas, a continuación. La cifra subía a 7.000 a lo largo de la erupción (13).

Nota aclaratoria: La erupción de Cumbre Vieja, 2021, ha sido el centro de una respuesta de investigación internacional liderada y dirigida en gran parte por agencias españolas, incluyendo el IGN, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) e INVOLCAN que informaron al Plan de Emergencias Volcánicas de Canarias (PEVOLCA). Este reportaje está escrito desde el punto de vista de una colaboración estrecha con INVOLCAN, la ausencia de información sobre el trabajo de otros investigadores es por simple desconocimiento de sus actividades por parte de la autora, que no pretende desvalorar su importancia.

Después del comienzo de la erupción, los mensajes volaban de un lado a otro y comenzaron mis preparativos para viajar a La Palma. Dedicué el lunes a reorganizar las clases con mis alumnos, comprar material esencial y obtener los permisos pertinentes. El martes partí a La Palma en un vuelo desde Málaga a Tenerife donde recogí algunos equipos de una compañera de INVOLCAN. Luego, salí en ferry hacia La Isla Bonita, la opción de viaje más segura para evitar demoras, ya que las cenizas volcánicas pueden cerrar el espacio aéreo, como se experimentó en 2010 con la erupción islandesa Eyjafjallajökull cuando los vuelos del norte de Europa se detuvieron durante seis días.

Una vez en la isla, condujimos hacia el oeste desde la terminal del ferry y, de repente, cuando llegamos a la cima de una colina, la erupción apareció a la vista: la luz roja y amarilla brillante (Fig. 5) y, sobre todo, el ruido continuo - como un avión despegando - eran pasmosos.



Fig. 4 El comienzo de la erupción (fotografía de Eduardo Robaina, 14).



Fig. 5 La erupción de noche (fotografía de Eduardo Robaina, 14).

Mi trabajo en la isla estuvo condicionado principalmente por los eventos que surgían: configurando el laboratorio de petrología (Fig. 6); obteniendo equipos y suministros; muestreando lava y tefra (piroclastos); hablando con los colegas; y preparando muestras para su posterior análisis. Sin apenas tiempo para detenerme a pensar aproveché la noche anterior de mi partida para quedarme despierta, simplemente observando y apreciando el espectáculo.

El sábado por la noche, el sexto día de la erupción, regresé a Tenerife en ferry. Luego, al día siguiente, de camino al aeropuerto recogí algunas muestras para otro proyecto diferente, aunque relacionado. De allí de vuelta a Málaga y a continuación a Granada.

4. DURANTE LA ERUPCIÓN

La actividad explosiva inicial coincidió con un temblor volcánico, la expulsión de lava de una fisura de 200 m de largo y una columna compuesta de gas rico en SO_2 (3 km de altura) y ceniza (1,5 km de altura). La construcción del cono se inició alrededor de la fisura principal, que pronto se convirtió en un conjunto de centros de emisión dominados por una columna de ceniza o fuentes de lava. Estos últimos alimentaron a los flujos que discurrieron hacia el oeste y el oeste-suroeste (1). La erupción era efusiva y explosiva a la vez, estromboliano con etapas freatomagmáticos (provocadas por interacción con agua). A lo largo de los 2 primeros meses PEVOLCA le asignó un índice de explosividad de 2, subiendo a 3 a finales de noviembre debido al volumen de materia expulsada, más de 10.000.000 metros cúbicos.

Una vez comenzada la erupción, las emisiones del gas SO_2 se midieron diariamente utilizando drones, escáneres estáticos e instrumentos satelitales en colaboración con la Universidad de Manchester, Reino Unido. También se realizaron análisis de isótopos de carbono de la columna de gas, CO_2 y de lixiviados de cenizas prístinas. Estos datos brindan información sobre los procesos eruptivos durante las fases inter-eruptiva, pre-eruptiva, eruptiva y post-eruptiva (12). Además de la sismicidad y las composiciones de gas y agua, otros enfoques del monitoreo incluyeron la medición de: la deformación de la superficie (15); señales acústicas (16); variaciones magnetotélúricas (17); relámpagos volcánicos (18); e imágenes infrarrojas (19). Nuestros estudios y resultados agregaron la petrología a esta mezcla.



Fig. 6 El laboratorio petrológico de INVOLCAN en La Palma.

De vuelta a la UGR seguía el trabajo. Una ventaja enorme fue contar con el Centro de Instrumentación Científica (CIC-UGR) donde se pudo hacer gran parte de los análisis requeridos.

Con el apoyo de los técnicos del Departamento de Mineralogía y Petrología y del CIC se consiguió preparar y analizar y obtener resultados, que fueron pasados a PEVOLCA, de los depósitos volcánicos de una manera rápida y eficaz con los siguientes métodos:

- Difracción de los rayos X por sólidos en estado cristalino (DRX) - identificación de los minerales que componen las muestras.
- Fluorescencia de rayos X (FRX) - cuantificación de las concentraciones de elementos mayores, p.ej., Si, Ca, Fe, Mg y Na en la roca total.
- Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICPMS) - cuantificación de las concentraciones de elementos traza, p.ej., Ni, Ba, Zr, La y Yb en la roca total.
- Microsonda de electrones - análisis de la composición de los minerales.
- Microscopio electrónico de barrido (SEM) - escaneo y medición de las estructuras internas y variaciones composicionales de los minerales (Fig. 7).

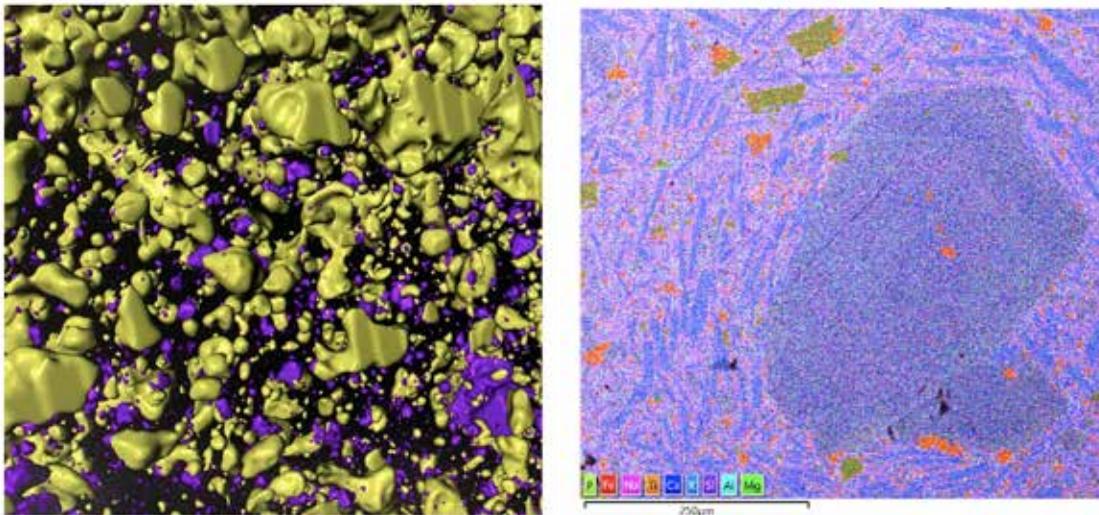


Fig. 7 A la izquierda, imagen de microscopio electrónico de barrido. A la derecha, microtomografía de rayos X, vacuolas - amarillo, óxidos de Fe-Ti - morado (4 mm).

- Estudio petrográfico de láminas delgadas al microscopio láminas muy finas de la lava, de 30 micras (Fig. 8).

A la vez colaboradores internacionales en el Reino Unido, Italia, Finlandia, Suiza, los Estados Unidos, trabajaban con el análisis automatizado de las composiciones de los minerales en dos y tres dimensiones como, por ejemplo, Qemscan (Fig. 9) y microtomografía de rayos X (Fig. 7).

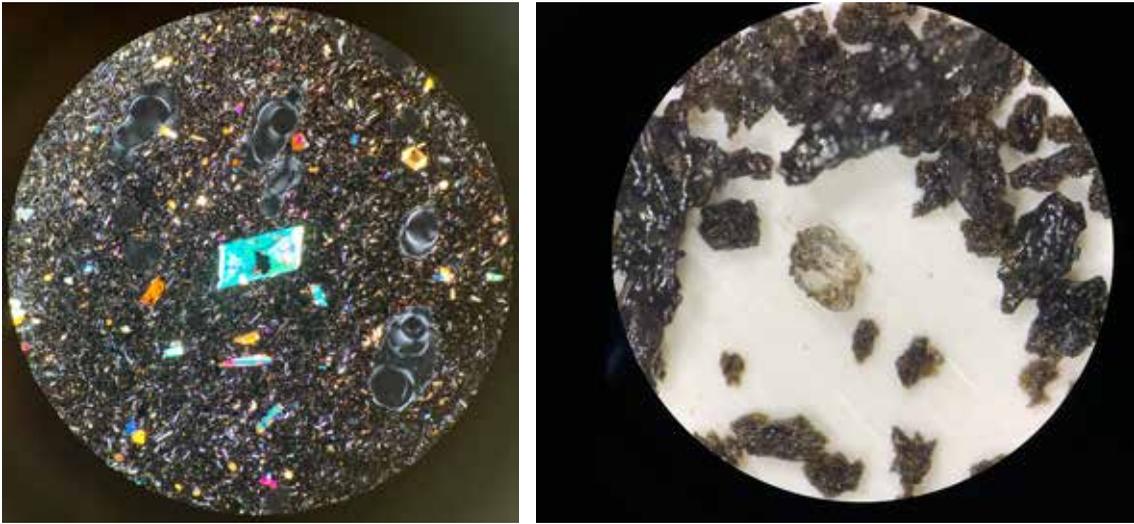


Fig. 8 A la izquierda, imagen de un cristal del mineral plagioclasa rodeado de fragmentos de tefra (5mm). A la derecha, imagen de la lava del volcán al microscopio, con nicoles cruzados, el mineral en el centro es clinopiroxeno (7 mm).

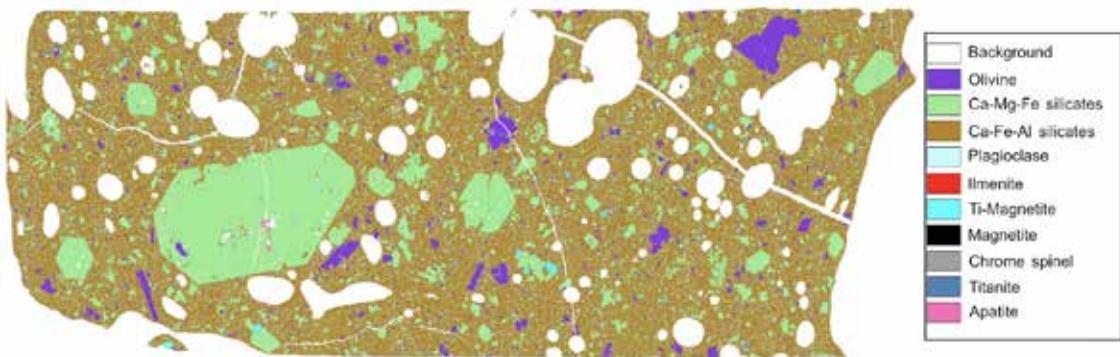


Fig. 9 Imagen de Qemscan de la lava, se identifica cada mineral con un color diferente (3 cm, imagen de J. Hickey).

El trabajo dio resultados, a las 3 semanas del comienzo de la erupción enviamos el primero estudio petrológico de las rocas, ahora publicado en la revista de acceso abierto Volcánica (10).

Mientras tanto los compañeros de INVOLCAN seguían muestreando la lava y la tefra casi todos los días (Fig. 10). La primera se hacía saliendo al anochecer para identificar con facilidad las partes más candentes de las coladas, visualmente o con una cámara térmica. Es muy importante la recolecta de las rocas lo más caliente posible para conservar las condiciones de temperatura que se aproximan a las del reservorio magmático por debajo del volcán antes de la salida a la superficie de la lava y su posterior enfriamiento.



Fig. 10 Compañero de INVOLCAN muestrando una colada de lava en el pueblo de Todoque.

Una vez extraída de la colada se ‘congeló’ el bloque de lava encendida en un cubo de agua conservando los datos de la composición exacta de los minerales, y registrando, así, información sobre las velocidades del enfriamiento y el ascenso del magma.

Por otro lado, se recogió la tefra de una manera más pasiva en una serie de cajas estacionadas a un rango de distancias y orientaciones diferentes del foco de emisión. De esta manera, poco a poco, crecía la INVOLCAN litoteca, actualmente disponible de libre acceso a la comunidad científica internacional para investigaciones sobre el volcán. El esfuerzo de obtener un registro completo de los productos de Cumbre Vieja permite tener un preciso control del desarrollo de la erupción. Facilitando la investigación de la composición y estructura de las rocas y las relaciones entre las partes fundidas y los minerales.

Me gustaría comentar que el ‘trabajo extra’ relacionado con la erupción del volcán se sumó a las responsabilidades cotidianas de investigación y docencia - clases de geoquímica para los estudiantes de tercero del Grado en Geología y prácticas de rocas para los de primero - además de organizar actividades de divulgación y responder a entrevistas de la prensa. Y, como siempre, luchando para conseguir fondos para seguir analizando e investigando los productos del volcán. En colaboración con compañeros del Reino Unido se preparó un proyecto para pedir fondos al ‘Natural Environment Research Council’, agencia del Gobierno británico, que con previsión eminente, admiten la posibilidad de pedir ‘fondos de urgencia’ para eventos naturales imprevistos como terremotos, huracanes y, por supuesto, erupciones volcánicas. Liderado por la Dra Katy Chamberlain, Universidad de Teesside, la propuesta ‘Petrological insights into magmatic evolution in an ongoing volcanic crisis’ tuvo éxito y el proyecto ha permitido avanzar de manera significativa en los conocimientos y el entendimiento de los procesos magmáticos de la erupción.

El día 13 de diciembre, 85 días después del inicio, la erupción de Cumbre Vieja paró, y se declaró finalizado el 25 de diciembre.

Los datos oficiales del Gobierno de Canarias sobre los daños provocados son espeluznantes (13) 1.219 hectáreas de lavas principalmente malpaís, con pocas cordadas, y coladas con una máxima extensión de 6,5 kilómetros, un nuevo delta de 48 hectáreas, un cono de 200 metros de tefra y seis cráteres de aproximadamente 100-170 m de diámetro, con un total de 34 millones de metros cúbicos de depósitos. A lo largo de la erupción aproximadamente 7.000 personas fueron evacuadas; los datos del Catastro indican que hubo 1.354 viviendas residenciales afectadas, además de 180 construcciones agrícolas, 75 industriales, 44 de hostelería, 16 de uso público y 16 de otros usos, aunque los datos no oficiales estiman un total de casi el doble de construcciones destruidas (20); la ruina de 370 hectáreas de cultivos principalmente plátanos (228 hectáreas) más viñas (68 hectáreas) y aguacates (27 hectáreas) y otra zona cultivada de unas 600 hectáreas cubierta de tefra; y por último 74 kilómetros de carreteras y 11 kilómetros de calles afectadas.

5. DESPUÉS DE LA ERUPCIÓN

Como es de esperar, la investigación siguió tras el cese de la erupción. Como ejemplo de la proliferación de estudios, recientemente en una sesión sobre Cumbre Vieja 2021 en la Asamblea General de la Unión de Geociencias Europeas, mayo 2020, se presentaron más de 50 trabajos de índole tanto geológica como social.

Las colaboraciones forjadas con el calor de la erupción continúan con fuerza y se están formando nuevas conexiones. De aquí nace un trabajo en común con la empresa suiza Sika para averiguar la utilidad de la tefra de Cumbre Vieja en su cemento, según la composición y textura de los piroclastos.

Volví a la isla en febrero con la investigadora principal del proyecto británico de urgencia, y seguíamos colaborando con compañeros de INVOLCAN en el procesamiento y análisis de las muestras. La diferencia en el aspecto de la zona desde septiembre era impactante sí, el ruido se había silenciado, pero se imponían extensas franjas de lava y tefra amontonada (Fig. 11).



Fig. 11 Coladas de lava y depósitos de tefra (fotografía por Mike Peel, 21).

Ya están disponibles la mayoría de los datos composiciones de roca total, que revelan algunas tendencias muy interesantes e instructivas a lo largo de la erupción (Fig. 12), siendo especialmente significativa la inflexión composicional a unas dos semanas antes del cese de la erupción, dado que potencialmente se podrán usar tendencias parecidas para señalar el fin de futuros eventos. Actualmente se está interpretando los procesos magmáticos en términos de fusión de la fuente mantélica y cristalización de los minerales presentes.

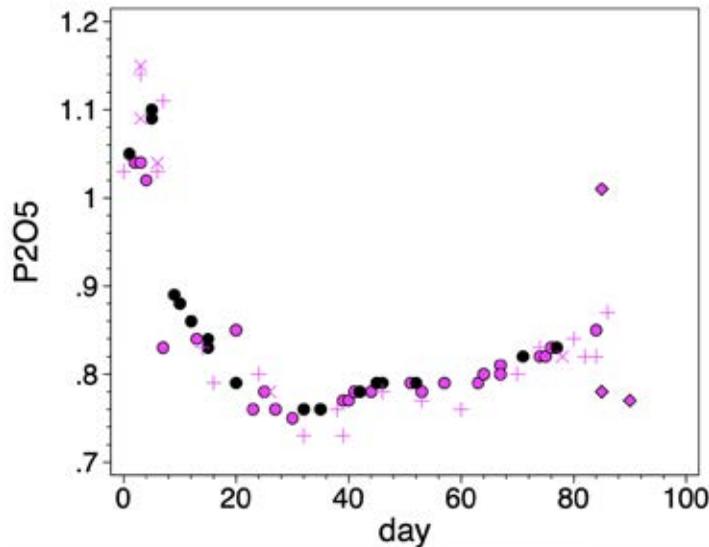


Fig. 12 Serie de tiempo de la composición de las lavas de la erupción.

Lo que queda por hacer es la cuantificación e interpretación de los datos de química mineral para concretar las condiciones de presión y temperatura y la velocidad de los procesos. Se han presentado los resultados iniciales en numerosas conferencias internacionales - Reino Unido, Finlandia, Austria (Fig. 13), Japón, Estados Unidos - y hay diversos manuscritos en estado de preparación.



Fig. 13 Presentación del proyecto británico de urgencia en la reunión anual de la Unión Europea de Geociencias, 2022 (22).

Mirando hacia el futuro el reto es la recuperación de la isla y su comunidad. Otro desafío importante es el de determinar cómo se pueden aplicar los conocimientos obtenidos de Cumbre Vieja para salvaguardar a otras comunidades que viven con volcanes.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Global Volcanism Program, Smithsonian Institution (2021) www.volcano.si.edu.
2. Web of Knowledge (2022) www.webofknowledge.com.
3. Torres-González, P.A., Luengo-Oroz, N., Lamolda, H., D'Alessandro, W., Albert, H., Iribarren, I., Moure-García, D. and Soler, V. (2020) Unrest signals after 46 years of quiescence at Cumbre Vieja, La Palma, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 392, e106757.
4. Longpré, M.A. and Felpeto A. (2021) Historical volcanism in the Canary Islands; part 1: A review of precursory and eruptive activity, eruption parameter estimates, and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 419, e107363.
5. Hernandez-Pacheco, A. and Valls, M. C. (1982) The historic eruptions of La Palma island (Canaries). *Arquipélago. Série Ciências da Natureza*, 3, 83–94.
6. Romero Ruiz, M.C. (1990) Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario. PhD thesis, University of La Laguna, Tenerife, Canary Islands, Spain.
7. Klügel, A., Galipp, K., Hoernle, K., Hauff, F. and Groom, S. (2017) Geochemical and volcanological evolution of La Palma, Canary Islands. *Journal of Petrology*, 58, 1227–1248.
8. White, J.D.L. and Schmincke, H.-U. (1999) Phreatomagmatic eruptive and depositional processes during the 1949 eruption on La Palma (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 94, 283–304.
9. Carracedo, J.C., Badiola, E.R., Guillou, H., de la Nuez, J. and Pérez Torrado, F.J. (2001) Geology and volcanology of La Palma and El Hierro, Western Canaries. *Estudios Geológicos*, 57, 175–273.
10. Pankhurst, M.J., Scarrow, J.H., Barbee, O.A., Hickey, J., Coldwell, B.C., Rollinson, G.K., Rodríguez-Losada, J. A., Martín Lorenzo, A., Rodríguez, F., Hernández, W., Calvo Fernández, D., Hernández, P.A. and Pérez, N.M. (2022) Rapid response pe-



Fig. 14 El Volcán de Cumbre Vieja 2021.

- tology for the opening eruptive phase of the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma, Canary Islands, *Volcanica*, 5, 1–10.
11. Pérez, N.M., Hernández, P.A., Melián, G.V., Padrón, E., Asensio-Ramos, M., Barrancos, J., Padilla, G.D., Rodríguez, F., D’Auria, L., Amonte, C., Alonso, M., Martín-Lorenzo, A., Calvo, D., Rodríguez, C., Hernández, W., Coldwell, B. and Pankhurst, M.J. and the International Collaborative Research TEAM (2022) The 2021 Cumbre Vieja eruption: an overview of the geochemical monitoring program, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022.
 12. Suarez, B. (2021) www.newsinfo.inquirer.net/1489933/people-evacuated-on-spanish-island-of-la-palma-after-volcano-eruption-warning.
 13. Gobierno de Canarias (2021) www.gobiernodecanarias.org/noticias/la-erupcion-de-la-palma-se-declara-finalizada-tras-85-dias-y-8-horas-de-duracion-y-1-219-hectareas-de-coladas.
 14. Robaina, E. (2021) www.lamarea.com/2021/09/21/del-dolor-al-espectaculo-las-dos-realidades-en-torno-al-volcan.
 15. González-Alonso, E., Lamolda, H., Quirós, F., Molina, A.J., Fernández-García, A., García-Cañada, L., Pereda de Pablo, J., Domínguez-Valbuena, J., Prieto-Llanos, F., and Sáez-Gabarrón, L. (2022) Combination of geodetic techniques for deformation monitoring during 2021 La Palma eruption, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022.
 16. Cigala, V., Kueppers, U., Vossen, C.E.J., Barrancos, J., Spina, L., Fee, D., Cimarelli, C., Gestrich, J., Schmid, M., Hernández, P., Pankhurst, M.J., D’Auria, L., Pérez, N., and Dingwell, D.B. (2022) Acoustic signals from the 2021 Cumbre Vieja eruption, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022.
 17. Martínez van Dorth, D., Piña-Varas, P., Cabrera-Pérez, I., Ledo, J., D’Auria, L., and Pérez, N. (2022) Electromagnetic monitoring of the Cumbre Vieja eruption (La Palma, Canary Islands), EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022.
 18. Vossen, C.E.J., Cimarelli, C., Cigala, V., Kueppers, U., Barrancos, J., Haarer, I., Schmid, M., Stoiber, W., D’Auria, L., Padilla, G., Hernández, P., and Pérez, N. (2022) Electrical activity of the 2021 Cumbre Vieja eruption, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022.
 19. Birnbaum, J., Lev, E., Hernandez, P., Barrancos, J., Padilla, G., Asensio-Ramos, M., Calvo, D., Rodríguez, F., Pérez, N., and Calvari, S. (2022) Temporal evolution of Cumbre Vieja explosive activity and ash plumes from ground-based infrared and visible cameras, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022.
 20. Copérnico, satélite de la Comisión Europea (2021) www.copernicus.eu/es/sobre-copernicus.
 21. Peel, M. (2021) www.mikepeel.net.
 22. Scarrow, J.H., Chamberlain, K.J., Pankhurst, M.J., Barbee, O.A., Coldwell, B.C., Hickey, J., Neave, D.A., Morgan, D.J., Martín-Lorenzo, A., Rodríguez, F., Rollinson, G.K., Hernández, W., Hernández, P.A., and Pérez, N.M. (2022) Time series compositional insights into magmatic evolution during the 2021 Cumbre Vieja eruption, La Palma, Canary Islands, Spain, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022.

El uso de la Inteligencia Artificial (IA) para producir erupciones volcánicas

Jesús M. Ibáñez^{1,2,}*

1) *Department of Theoretical Physics and Cosmos. Science Faculty. Avd. Fuenteneueva s/n. University of Granada. 18071. Granada. Spain.*

2) *Andalusian Institute of Geophysics. Campus de Cartuja. University of Granada. C/Profesor Clavera 12. 18071. Granada. Spain.*

** Jesús M. Ibáñez (jibanez@ugr.es)*

En este artículo nos planteamos el uso de la Inteligencia Artificial para pronosticar erupciones volcánicas. El objetivo es acercar al lector cómo podemos combinar diferentes disciplinas con un objetivo final: salvar vidas y de mitigar los efectos sobre la población de una erupción volcánica. Es evidente que estamos hablando de un esfuerzo multidisciplinar, de manera que la programación y aplicación de la Inteligencia Artificial es el campo de lo que conocemos como Ingeniería Informática o las TICs, Tecnologías de la Información y la Comunicación, que vamos a combinar con la Física de los volcanes. Hablamos de la Física porque los procesos internos de una erupción sólo pueden explicarse a través de las leyes físicas que se aplican a procesos Geológicos, es decir procesos de la Tierra, Física de la Tierra. Es por ello que este artículo lo estructuramos en diferentes partes, primero vamos a hacer una rápida descripción de nuestra herramienta ¿Qué es la Inteligencia Artificial?, sin entrar en grandes profundidades. Luego presentaremos el problema, es decir, ¿qué es una erupción volcánica y qué observamos desde el punto de vista físico? Para finalizar explicando cómo combinando ambos podemos pronosticar erupciones futuras.

Aproximadamente el 15% de la población de la Tierra vive muy cerca de uno o más de los 1500 volcanes activos de nuestro planeta. Los impactos de las erupciones van desde escalas locales a regionales y globales. La Estrategia de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres reconoce los peligros potenciales derivados de la actividad volcánica y recomienda que se tomen medidas para desarrollar nuevas herramientas y prácticas para mitigar el riesgo volcánico. Las erupciones recientes proporcionan ejemplos claros. La erupción de Eyjafjallajökull (Islandia) de 2010 interrumpió gravemente el tráfico aéreo del hemisferio norte durante semanas. La erupción de Krakatoa (Indonesia) en 2018 generó un tsunami ‘inesperado’ que provocó cientos de víctimas y el desplazamiento de muchos miles de sus hogares. El 15 de enero de 2022 la erupción Hunga-Tonga provocó una de las explosiones volcánicas más energética en más de un siglo, que fue detectada en todo el mundo. Miles de personas en Tonga necesitaban ayuda externa, con edificios destruidos y comunicaciones interrumpidas y causando víctimas. La comunidad científica continúa sus esfuerzos para desarrollar sistemas de alerta temprana de volcanes y entre ellos el uso de la Inteligencia Artificial es uno de sus pilares más importantes.

¿Qué es la Inteligencia Artificial?

La inteligencia artificial (IA)^{1,2} de manera general se define como a cualquier comportamiento similar al humano mostrado por una máquina o sistema. En la forma más básica de IA, los ordenadores se programan para “imitar” el comportamiento humano utilizando una gran cantidad de datos de ejemplos anteriores basados en la experiencia de un comportamiento conocido y similar al que queremos predecir. De esta manera, a modo de ejemplo sencillo, se puede programar un ordenador para reconocer las diferencias entre un perro y un gato, pero también en ser controladoras de las actividades complejas en una fábrica de coches o tomar decisiones de toda la red de semáforos de una ciudad.

La IA tiene diferentes tipos de aproximaciones o enfoques como el aprendizaje profundo (Deep Learning)³, pensamiento estratégico (Strategic Thinking) u otras especies o clases de IA, pero todas ellas comparten el hecho de que se usan para resolver situaciones que requieren respuestas ultrarrápidas. El proceso de trabajo de la IA es hacer que los ordenadores pueden trabajar de manera eficiente y analizar grandes cantidades de datos (Big Data) muy rápido, resolviendo problemas que de otra manera o no se podría o se tardaría un tiempo enorme. Pero para ello debemos hacer que estos ordenadores aprendan, sólo hará lo que se les enseñe y en función de cómo se les enseñe, y este aprendizaje se puede calificar como aprendizaje supervisado, no supervisado o reforzado (más adelante vamos a ver su significado).

Si bien una de las primeras aplicaciones sociales de la IA fue usar los ordenadores o procesadores para jugar al ajedrez o las damas, ahora la IA está presente en nuestra vida mucho más de lo que pensamos: nos ofrecen publicidad específica a nuestros gustos sin que la pidamos, es la responsable de los servicios de atención al público automatizados, controlan los semáforos, controlan los mercados financieros e incluso deciden las estrategias electorales. Pero también son una herramienta eficaz para dar soluciones en atención médica, en servicios de compras online, de fabricación y en el entretenimiento televisivo con los canales interactivos; nos recomiendan lo que podemos ver o “deseamos” ver.

El gran cambio que ha permitido avanzar en la IA se produce cuando se pasa de ordenadores que sólo pueden ejecutar operaciones, a sistemas que pueden almacenar la información e instrucciones. El pionero de este paso fue Alan Turing que en 1950 plantó las bases teóricas de cómo pasar de máquinas de cálculo a máquinas inteligentes. Con el aumento de la velocidad de cálculo, de almacenamiento y sobre todo de la reducción de tamaños, pasando de los ordenadores de válvulas a los de estado sólido hizo que en la década de los años 80 del siglo XX se diera el gran paso, donde los pioneros John Hopfield y David Rumelhart desarrollaron los algoritmos de lo que ahora conocemos como Deep Learning, es decir hacer que los ordenadores aprendieran a través de la experiencia adquirida previamente. Podemos decir que uno de los hitos que marcó el despegue de estos procedimientos fue cuando en 1997, el ordenador llamado Deep Blue de IBM derrotó al que en ese momento era el campeón del mundo de ajedrez Gary Kasparov, pero hubo otros hitos similares en pocos meses.

¿Qué entendemos por “aprender automático” o Machine Learning?. Decimos que un ordenador “aprende”⁴ cuando sus programas o software son capaces de predecir y reaccionar con éxito ante unos escenarios que se están produciendo en ese momento en función de los resultados anteriores, es decir es capaz de responder (resolver un problema) a una entrada de datos en el presente en función de los que ya almacenó como información en el pasado. La función de aprendizaje establece una tarea a resolver y las funciones que establecerán el conjunto de observaciones que permitirán resolver la actividad en cuestión. Denominamos Machine Learning al proceso mediante el cual los ordenadores desarrollan una serie de patrones de reconocimiento, o la capacidad de aprender continuamente y por tanto poder tomar decisiones o hacer predicciones basadas en grandes volúmenes de datos almacenados previamente. Pero es más, se puede ir más adelante y pueden hacer ajustes a sus modelos sin estar específicamente programados para dichos ajustes, es decir permite que las máquinas se adapten a nuevos escenarios de forma independiente. ML es solo una de las formas en que podemos aplicar la Inteligencia Artificial. La IA tiene, de hecho, una definición más amplia, dinámica y compleja.

Pero para “aprender” debemos “enseñar”, es decir además de programas con algoritmos debemos presentar nuestros modelos sobre los que los ordenadores van a aprender. Existe en la literatura una serie de pasos que presentan de manera simplificada en cuatro pasos este proceso de “enseñanza”:

1. Seleccionamos y preparamos un conjunto de datos de entrenamiento necesarios para resolver el problema. Estos datos pueden estar etiquetados o no etiquetados. Etiquetados significa que les ponemos un nombre si existen más de un tipo diferente de datos (por ejemplo perros, gatos, tigres, etc.). No etiquetados significa que el conjunto no está inicialmente diferenciado (por ejemplo animales).

2. Elegimos un algoritmo para ejecutar en los datos de entrenamiento. Este paso es fundamental, debemos entrenar con un número suficiente de datos y de calidad que no presente dudas de que son modelos de cada una de las clases seleccionadas previamente. Dentro de esta función, hay tres grandes paradigmas de aprendizaje: el supervisado, el no supervisado y el aprendizaje por refuerzo.

3. Entrenamos el algoritmo para crear el modelo. Lo que podrá implicar incluir nuevos datos o mejorar dicha base de datos.

4. Utilizamos y mejoramos el modelo.

Podemos hacer una clasificación sencilla para los métodos de aprendizaje automático: El aprendizaje “supervisado” que funciona con datos etiquetados y requiere que el entrenamiento sea más simple. El aprendizaje supervisado resuelve las tareas en base a un conocimiento previo para realizarlo. El aprendizaje no supervisado se suele utilizar para clasificar datos no etiquetados y que se basa en la identificación de patrones y sus relaciones. El no supervisado establece diferentes parámetros y plantea una solución en

base a los mismos. El aprendizaje semisupervisado utiliza un pequeño conjunto de datos etiquetados para ser la fuente inicial en la clasificación de un conjunto de datos más grande que se encuentra sin etiquetar.

¿Qué entendemos por aprendizaje profundo o Deep Learning?. El Deep Learning es un subconjunto del Machine Learning que se usa para determinar patrones complejos, o no intuitivos, en los modelos de entrenamiento, o en las bases de datos, o en los modelos predictivos y que requiere una realización con técnicas más complejas. El Deep Learning utiliza en muchas de sus aproximaciones una combinación de lo que se conoce como redes neuronales artificiales multicapa y entrenamiento intensivo en datos y computación, inspirada en un símil del comportamiento del cerebro humano. Este enfoque se ha vuelto tan efectivo que incluso ha comenzado a superar las capacidades humanas en muchas áreas, como el reconocimiento de imágenes y voz y el procesamiento del lenguaje natural. Debemos tener en cuenta que los modelos de aprendizaje profundo procesan grandes cantidades de datos y usan diferentes aproximaciones de redes neuronales que reciben diferentes nombres como Recurrentes (RNN)⁵, Convolucionales (CNN)⁶, o Bayesianas (BNN)⁷ entre otras.

¿Qué es una red neuronal?, ¿Es algo físico o de programación? Las redes neuronales⁸ son un pilar de la inteligencia artificial. Son un modelo de programación cuyo sistema se basa en el funcionamiento del cerebro de los seres vivos. El cerebro tiene un conjunto de neuronas conectadas entre sí, que trabajan en conjunto pero que inicialmente no tienen una tarea concreta. Con el tiempo y la experiencia las neuronas crean determinadas conexiones que permiten aprender y que fijan el proceso de aprendizaje. Este símil en realidad es fisiológico, y desde el punto de vista de la Inteligencia Artificial no existe pues estas redes neuronales son algoritmos matemáticos y estadísticos, cada uno realizando una función concreta o nodos y estos diferentes nodos funcionan como neuronas, y que transmiten señales e información entre sí. Estas redes reciben diferente información de entrada, la procesan en conjunto y generan una salida con las predicciones establecidas en función de lo que se haya programado. Su finalidad es la de encontrar soluciones a determinados “problemas”. Las redes neuronales son un modelo para encontrar esa combinación de parámetros y aplicarla al mismo tiempo. Esta función está basada en las interconexiones de las neuronas biológicas y en sus diferentes procesos de capas. En la Inteligencia Artificial también existe este símil de capas. La primera capa funciona como un sistema de entrada que recibe los datos y los envía a la segunda y la tercera capa que los va analizando en función de los determinados algoritmos, y así sucesivamente. En el lenguaje propio, encontrar la combinación que mejor se ajusta es “entrenar” la red neuronal. Una red ya entrenada se puede usar luego para hacer predicciones o clasificaciones, es decir, para “aplicar” la combinación de esos parámetros de entrada. Los modelos de las redes neuronales artificiales están basados principalmente en modelos matemáticos definidos por la función $f: X \rightarrow Y$ o una distribución más X o ambos X e Y ; aunque a veces los modelos también se asocian a algoritmos de aprendizaje. Resulta evidente que todo este proceso descrito aquí se va complicando en función del problema que queremos resolver.

Hoy en día todo este tipo de aprendizaje lo tenemos incorporado como rutina en nuestra vida, hacemos una foto y reconoce las caras, reconoce la voz, sigue el movimiento de los jugadores en un campo deportivo y realiza sus estadísticas, etc. Pero, ¿cómo aplicarlo para predecir las erupciones volcánicas? Primero repasemos qué es una erupción volcánica y qué necesitamos para predecirla.

¿Qué es una erupción volcánica?

Una erupción volcánica es la consecuencia final de una serie de procesos energéticos físicos y químicos en el interior de la Tierra. Sus manifestaciones externas son la emisión de magma y gases así como intercambios de diversas formas de energía. Las erupciones van desde flujos de lava fluida hasta grandes explosiones con emisiones voluminosas de material a la atmósfera; las escalas de tiempo de estos procesos varían de minutos a años, incluso para volcanes individuales, lo que indica que las erupciones están asociadas con procesos casi estables que complican el pronóstico a corto plazo. La búsqueda de precursores (es decir, observables físicos asociados con tales procesos) es uno de los desafíos de la vulcanología moderna.

Los sismogramas registran el movimiento del suelo en una posición dada como una función del tiempo⁹. La señal medida refleja la dinámica del volcán (movimiento de fluidos y otros procesos que inducen estrés) en forma de radiación de energía de fuentes ubicadas dentro o en la superficie de la Tierra que se propagan en forma de ondas elásticas (es decir, sísmicas). Los sismómetros miden el movimiento del suelo asociado, junto con el movimiento del suelo producido por otros fenómenos (por ejemplo, el tráfico, las olas del mar, el viento). La actividad volcánica genera una variedad de señales sísmicas-volcánicas (Fig. 1, Fig. 2) que ofrecen evidencia de múltiples fuentes que actúan dentro del entorno volcánico; la mayoría son responsables o están asociados con erupciones volcánicas.

La sociedad tiene una alta vulnerabilidad a las erupciones volcánicas a escala local y global. La comunidad científica continúa invirtiendo en el desarrollo de sistemas de alerta temprana de volcanes. La sismología, debido a su disponibilidad en tiempo real y resolución temporal inigualable, es la columna vertebral de todos los sistemas de monitoreo de volcanes en todo el mundo. Los datos sísmicos tienen resoluciones espaciales y temporales altas, y es la única disciplina científica que proporciona series de tiempo largas; los tiempos de procesamiento son rápidos y por lo tanto proporcionan información casi en tiempo real. Además, muy a menudo, los datos sísmicos son los únicos datos disponibles para una erupción o volcán determinado. Hay varios ejemplos en los que la predicción de erupciones volcánicas basada en estudios sísmicos fue un claro éxito, incluidos Pinatubo (Filipinas, 1991) y Merapi (Indonesia, 2010).

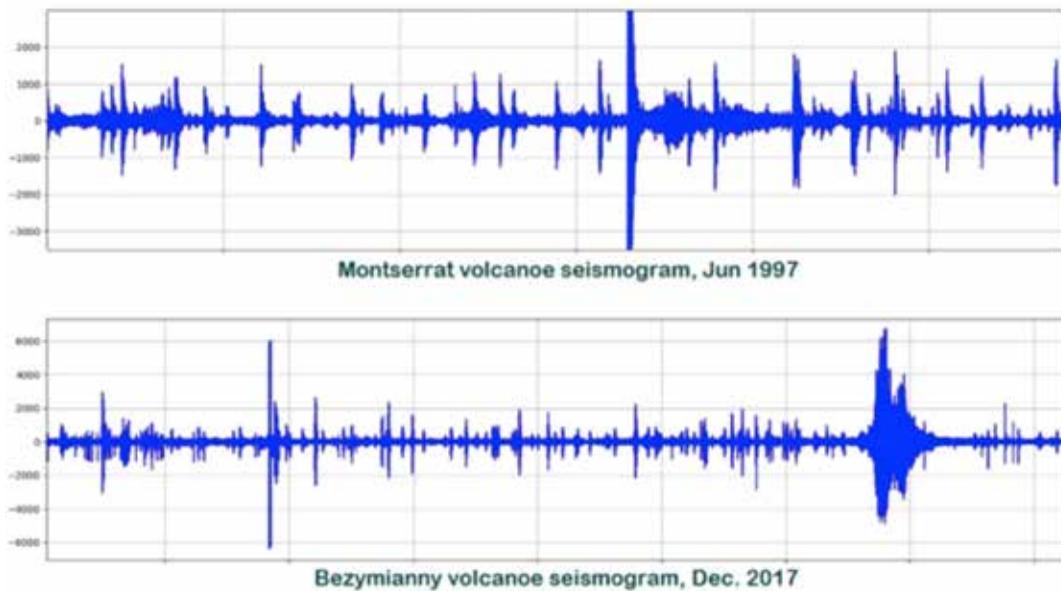


Figura 1. Dos ejemplos, de una hora de duración de un registro sísmico para dos volcanes diferentes. Arriba, volcán Soufriere Hills en la Isla de Montserrat en el Caribe. Abajo del volcán Bezymianny en Kamchatka. Podemos observar la complejidad del registro sísmico volcánico

Así, cuando hablamos de sismogramas todos tenemos en mente un terremoto, el que percibimos en nuestro entorno cuando la tierra tiembla. Este tipo de señales es el producto de un mecanismo concreto de transferencia de energía dentro de la Tierra¹⁰. En este caso la energía elástica asociada a la dinámica de la Tierra se acumula en un punto del interior deformando el entorno. Inicialmente de un modo elástico, luego plástico hasta alcanzar lo que se denomina punto de ruptura lo que rompe el terreno, genera lo que denominamos falla y libera energía en forma de ondas sísmicas, es decir en un terremoto.

Pero los procesos volcánicos son mucho más complejos. En primer lugar porque son los fluidos los principales transmisores de energía. Estos fluidos no sólo son el magma, que es lo que primero se nos viene a la mente, sino los gases que son emitidos, pero también el agua. El agua, que se encuentra subterránea en los acuíferos, o disuelta en los materiales de la corteza y el manto, es uno de los elementos más explosivos de la naturaleza, juega un papel fundamental en la dinámica volcánica y en el intercambio de energía. La dinámica de estos fluidos hace que se acumule energía en el medio sólido y pueda romperse, originando terremotos, a los que denominamos terremotos Volcano-Tectónicos. Pero en su desplazamiento originan otras señales que son mucho más importantes para asociarlas con la dinámica eruptiva del volcán. Así, por ejemplo, el crecimiento de burbujas dentro del magma, hace resonar el sistema volcánico creando una señal característica que se denomina evento de largo periodo o LP. Pero el desplazamiento intenso de estos fluidos hace que la tierra vibre o tiemble de manera continuada, generando lo que denominamos temblor volcánico (Fig. 3). Por tanto, estas señales sismo-volcánicas contienen información crucial para descifrar los procesos que controlan la ocurrencia, el momento y la magnitud de las erupciones.

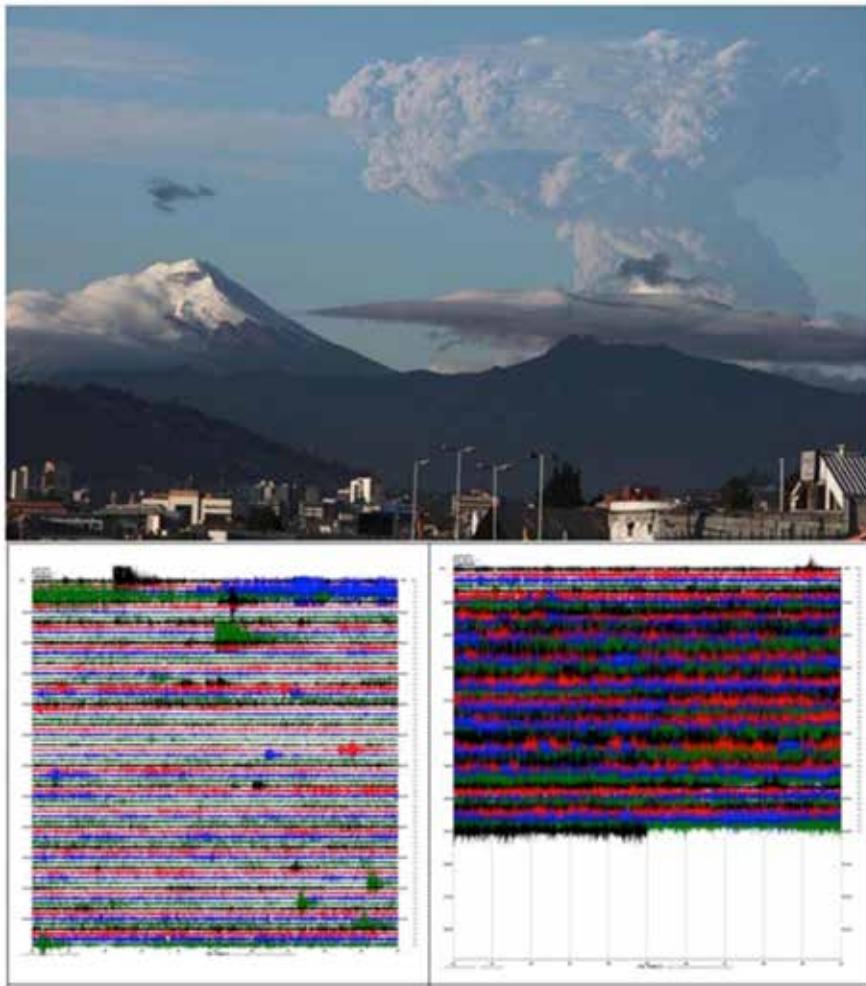


Figura 2. Imagen del volcán Tungurahua (Ecuador en erupción). Se puede observar a la derecha de la imagen el gran penacho de ceniza como producto de una de las muchas explosiones de este proceso eruptivo. Debajo se muestran dos registros sísmicos de este mismo volcán durante la erupción. A la izquierda de un día de intensa actividad. A la derecha más de mediodía de actividad muy intensa. En ambos casos la señal es tan compleja que a ojos de un observador sólo se ven borrones. Es aquí donde precisamente la Inteligencia Artificial juega un papel fundamental para discriminar y obtener información de estas señales.

Todos los días, el personal de los Observatorios Volcanológicos asigna etiquetas a los eventos sísmicos detectados utilizando criterios previamente establecidos. Al dar un nombre a cada señal, el observador asume implícitamente un estado volcánico. Los analistas sísmicos generalmente se enfocan en estudiar subconjuntos pequeños de terremotos, pero durante las crisis volcánicas, las redes sísmicas pueden registrar varios eventos por minuto durante períodos de días a meses, o incluso años, lo que hace humanamente imposible estudiar todos. El análisis de una pequeña fracción de los datos disponibles puede resultar en una interpretación parcial y/o sesgada. Los modelos actuales de pronóstico de erupciones que utilizan la sismología se basan en las relaciones entre las señales sismo-volcánicas, la evaluación de sus mecanismos de origen y los modelos de evolución de la actividad volcánica.

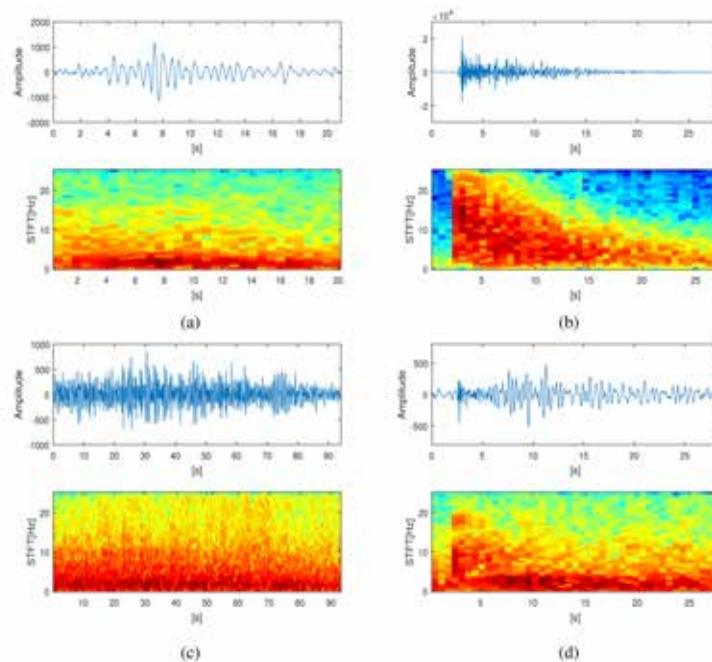


Figura 3. Cuatro ejemplos aislados de señales sismo-volcánicas. En azul se representa el sismograma, es decir la variación del movimiento del suelo a lo largo del tiempo. En colores lo que se denominada espectrograma, es decir la variación del contenido en frecuencias de estas señales a lo largo del tiempo. Cada señal está asociada a un modelo de fuente, es decir a algún proceso de dinámica de fluidos diferente. Cuando estas señales aparecen solapadas es imposible discriminarlas, por lo que es necesario usar técnicas de Inteligencia Artificial para poder discriminarla y entender la dinámica del volcán.

El pronóstico de erupciones volcánicas se basa en la capacidad de identificar estos tipos de señales y cambios en ellas asociados al cambio del estado del volcán, derivadas del análisis de series temporales geofísicas, múltiples datos y en la implementación exitosa de dichos marcos de análisis de datos para el reconocimiento de patrones en tiempo real o casi real.

¿Qué ofrece la Inteligencia Artificial?

Hasta la fecha, la identificación de cambios en los sistemas volcánicos que puedan llevar a una erupción se basa en la detección y caracterización de diferentes clases de señales sísmicas volcánicas. Como se ha mencionado anteriormente, la mayoría de los Observatorios Volcanológicos se basan en la clasificación y el conteo manual de tales eventos sísmicos, lo cual sufre de la subjetividad humana y puede volverse inviable durante una reactivación volcánica o una crisis sísmica. Por esta razón, la clasificación manual debe ser sustituida por un procesamiento automatizado, y aquí es donde entra en juego el aprendizaje automático (ML). La exploración completa de estos datos podría reconocer nuevos precursores, y este paso usando la intervención humana es imposible. Por lo tanto, los esfuerzos de investigación en los últimos años se han centrado en mejorar nuestra capacidad para procesar de manera eficiente grandes volúmenes de datos sísmicos. El uso de aprendizaje automático (ML) para estudiar señales sísmico-volcánicas ofrece una oportunidad única para obtener la máxima información en el menor tiempo.

Deep Learning (DL) ofrece un enfoque poderoso y eficiente para identificar patrones ocultos en los datos y determinar las relaciones no lineales entre los datos. DL permite extraer conocimiento de manera eficiente en el procesamiento de grandes bases de datos. Por esta razón, el uso de procesamiento de señales avanzado y DL proporciona herramientas más allá de la intuición humana para identificar patrones y características aún no utilizadas que pueden relacionar la sismicidad con la agitación volcánica. En sismología, ML se usa para identificar patrones invisibles o características nuevas y significativas dentro de conjuntos de datos. Existe una gran cantidad de literatura sobre detección y clasificación automáticas de señales volcánicas sísmicas, incluidos algoritmos basados en propiedades de señal, reducción de dimensionalidad, vectores incrustados, modelos de mezcla gaussiana (GMM), modelos ocultos de Markov (HMM)¹¹⁻¹³ y redes neuronales artificiales (ANN). En particular, se ha demostrado que el entrenamiento supervisado y no supervisado es eficaz para su uso con redes neuronales profundas (DNN) y redes neuronales bayesianas (BNN)^{14,15}. Las redes neuronales recurrentes (RNN) también se han utilizado para la clasificación de flujos de datos volcánicos-sísmicos.

El uso actual de ML ha podido realizarse después de superar grandes limitaciones. 1) Se han podido entrenar grandes conjuntos de datos sísmicos que previamente han sido etiquetados por observadores humanos a través de su experiencia, y se está trabajando para que el resultado pueda generalizarse y transferirse fácilmente a otros sistemas volcánicos. 2) Cuando un volcán muestra una reactivación, pueden ocurrir varios procesos simultáneamente en el mismo lugar, produciendo un conjunto de señales superpuestas en el registro sísmico que la aplicación de estas técnicas de ML los reconocen por encima de las observaciones directas humanas. 3) La creación de un catálogo implica la asignación de una etiqueta a cada evento detectado. La aplicación uniforme de las técnicas de ML usando los mismos criterios de etiquetado está evitando la confusión cuando se comparan diferentes escenarios volcánicos. Además, las etiquetas a menudo están vinculadas a mecanismos de fuentes sísmicas específicas, con lo que un buen etiquetado asocia la señal a la verdadera fuente, lo que nos avanza en poder realizar alertas tempranas eficientes. 4) Finalmente, se han logrado avances significativos en el desarrollo de modelos de fuentes sísmicas volcánicas, confirmados utilizando datos de redes sísmicas densas, permanentes y de alta calidad. Combinados estos modelos con los resultados de ML, la información dada a las autoridades nos permite avanzar en alertar de manera eficiente de cuándo se va a producir una erupción. El resultado directo es que ahora se puede informar de manera más eficiente a las autoridades de lo que está ocurriendo en un sistema volcánico, y pronosticar su evolución al combinar los datos registrados, su identificación y los mecanismos de fuente que los origina, lo que da lugar a un pronóstico eficaz.

Pero las técnicas de ML para estudiar y pronosticar erupciones no sólo se usan en sismología. La tecnología de sensores remotos situados en satelitales (InSAR) se utiliza cada vez más para controlar los cambios de la superficie de la Tierra en general y los volcanes en particular, sobre todo cuando el volcán se deforma previo a una erupción. El Programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Unión Europea (UE) ha contribuido recientemente con el lanzamiento y posicionamiento de nuevos satélites

multiespectrales Sentinel-2, capaces de proporcionar datos espaciales de alta resolución para el seguimiento de volcanes activos, además de complementar imágenes espaciales de otros satélites más antiguos como los Landsat.

Aunque de forma más limitada, debido sobre todo a la escasez de datos, las técnicas de ML se ha aplicado a otras observaciones, como la composición de los gases emitidos por los volcanes, fundamentalmente CO₂, SO₂ o SH, a datos de deformación medidos con distanciómetros o teodolitos, a datos de composición de las rocas, temperaturas de lava y otros parámetros que se pueden medir en los volcanes.

Las técnicas de ML tendrán un impacto cada vez mayor en la forma en que estudiamos y podemos realizar modelos de funcionamiento de los volcanes en todos sus aspectos, cómo los observamos y cómo evaluamos sus peligros, tanto a corto como a largo plazo. El creciente número de equipos de registro sísmico y de otras disciplinas instalados en los volcanes, por un lado, proporciona más y más datos, por el otro, a menudo hace que su procesamiento en tiempo real sea inviable, especialmente cuando más se necesita, es decir, durante crisis y erupciones volcánicas. Aquí ML mostrará su mejor utilidad, ya que puede proporcionar las herramientas perfectas para filtrar grandes datos para identificar patrones sutiles que podrían indicar estas reactivaciones, con suerte mucho antes de den lugar a las erupciones. Una cuestión importante es la de la generalización. Debemos ir hacia la construcción de modelos ML que se puedan aplicar en diferentes volcanes, por ejemplo cuando no se dispone de datos previos para entrenar modelos específicos. Los conceptos de transferencia de aprendizaje pueden ser importantes aquí.

Se debe promover el uso rutinario de herramientas ML en los diferentes Observatorios Volcanológicos proporcionando procedimientos de instalación sencillos y una fácil integración en los sistemas de monitoreo existentes. El software de código abierto debe elegirse siempre que sea posible. Por otro lado, los observatorios deben proporcionar buenos datos de entrenamiento abiertos a los desarrolladores, investigadores y científicos de datos de ML para mejorar los modelos de erupciones volcánicas. Se debe aprovechar una fácil disponibilidad de datos de libre acceso, tanto desde el propio entono volcánico como desde los satélites, para construir conjuntos de entrenamiento confiables en los diferentes campos de la vulcanología. Los métodos de detección novedosos muestran una aplicación prometedora para estudiar volcanes. Esto permitirá la mayor interacción entre grupos de investigación que utilizan diferentes enfoques de ML y facilitará la comparación directa de los resultados, como es común en otras disciplinas donde los conjuntos de datos de entrenamiento “estándar” están disponibles para ser usados para el bien de todos y en general de la Sociedad.

Referencias.

- 1.- Kok, J. N., Boers, E. J., Kusters, W. A., Van der Putten, P., & Poel, M. (2009). Artificial intelligence: definition, trends, techniques, and cases. *Artificial intelligence*, 1, 270-299.
- 2.- Malfante, M., Dalla Mura, M., Métaixian, J. P., Mars, J. I., Macedo, O., & Inza, A.

- (2018). Machine learning for volcano-seismic signals: Challenges and perspectives. *IEEE Signal Processing Magazine*, 35(2), 20-30.
- 3.- Shone, N., Ngoc, T. N., Phai, V. D., & Shi, Q. (2018). A deep learning approach to network intrusion detection. *IEEE transactions on emerging topics in computational intelligence*, 2(1), 41-50.
 - 4.- Bonaccorso, G. (2017). *Machine learning algorithms*. Packt Publishing Ltd.
 - 5.- Titos, M., Bueno, A., García, L., Benítez, M. C., & Ibañez, J. (2018). Detection and classification of continuous volcano-seismic signals with recurrent neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(4), 1936-1948.
 - 6.- Calderón, F., Pérez, N., Benítez, D. S., & Riofrío, D. (2020, October). Volcanic seismic event classification based on CNN architectures. In *2020 IEEE ANDESCON* (pp. 1-6). IEEE.
 - 7.- Bueno, A., Benitez, C., De Angelis, S., Moreno, A. D., & Ibañez, J. M. (2019). Volcano-seismic transfer learning and uncertainty quantification with Bayesian neural networks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(2), 892-902.
 - 8.- Guresen, E., & Kayakutlu, G. (2011). Definition of artificial neural networks with comparison to other networks. *Procedia Computer Science*, 3, 426-433.
 - 9.- Ibañez, J. M., Pezzo, E. D., Almendros, J., La Rocca, M., Alguacil, G., Ortiz, R., & García, A. (2000). Seismovolcanic signals at Deception Island volcano, Antarctica: Wave field analysis and source modeling. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B6), 13905-13931.
 - 10.- Díaz-Moreno, A., Ibañez, J. M., De Angelis, S., García-Yeguas, A., Prudencio, J., Morales, J., ... & García, L. (2015). Seismic hydraulic fracture migration originated by successive deep magma pulses: The 2011–2013 seismic series associated to the volcanic activity of El Hierro Island. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(11), 7749-7770.
 - 11.- Benítez, M. C., Ramírez, J., Segura, J. C., Ibanez, J. M., Almendros, J., García-Yeguas, A., & Cortes, G. (2006). Continuous HMM-based seismic-event classification at Deception Island, Antarctica. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, 45(1), 138-146.
 - 12.- Ibañez, J. M., Benítez, C., Gutiérrez, L. A., Cortés, G., García-Yeguas, A., & Alguacil, G. (2009). The classification of seismo-volcanic signals using Hidden Markov Models as applied to the Stromboli and Etna volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 187(3-4), 218-226.
 - 13.- Cortés, G., Arámbula, R., Gutiérrez, L., Benítez, C., Ibañez, J., Lesage, P., ... & García, L. (2009, July). Evaluating robustness of a HMM-based classification system of volcano-seismic events at colima and popocatepetl volcanoes. In *2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Vol. 2, pp. II-1012)*. IEEE.
 - 14.- Bueno, A., Balestriero, R., De Angelis, S., Benitez, C., Zuccarello, L., Baraniuk, R., ... & Maarten, V. (2021). Recurrent Scattering Network detects metastable behavior in polyphonic seismo-volcanic signals for volcano eruption forecasting. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1-22.
 - 15.- Rodriguez, A. B., Benítez, C., Zuccarello, L., De Angelis, S., & Ibañez, J. M. (2021). Bayesian monitoring of seismo-volcanic dynamics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 1-14.

Radiografías de los volcanes

Jesús M. Ibáñez^{1,2,}, Janire Prudencio^{1,2,&}*

- 1) Department of Theoretical Physics and Cosmos. Science Faculty. Avd. Fuenteneueva s/n. University of Granada. 18071. Granada. Spain.
- 2) Andalusian Institute of Geophysics. Campus de Cartuja. University of Granada. C/Profesor Clavera 12. 18071. Granada. Spain.

* Jesús M. Ibáñez (jibanez@ugr.es)

& Janire Prudencio (janire@ugr.es)

En este artículo nos planteamos las dificultades que tenemos para conocer cuál es la estructura del interior de la Tierra y en especial de los volcanes; es decir, ¿cómo podemos saber qué hay debajo del terreno que pisamos?, ¿cómo podemos conocer la estructura de un volcán? En nuestra vida cotidiana tenemos el sentido de la vista que es lo que nos permite ver pero, ¿qué significa ver? Cuando nosotros identificamos un sonido o vemos, estamos transfiriendo un tipo de energía que se propaga por el medio hasta nuestros sentidos. Sin embargo, cuando miramos hacia abajo, lo único que podemos distinguir es la superficie que estamos pisando, ¿cuál es la diferencia? Nuestros sentidos transforman la llegada de un tipo de energía en impulsos nerviosos que nuestro cerebro procesa. Pero para ello, el medio debe permitir este tipo de energía, es decir, debe de ser transparente. Nosotros estamos habituados con esa transparencia con la luz y la atmósfera; la luz no es más que una onda energética electromagnética que viaja a través de la atmósfera o el vacío. Cuando con nuestra vista hemos identificado un objeto, es porque la luz se ha reflejado en él y si además apreciamos color, significa que lo que apreciamos es lo que el cuerpo no se ha quedado de él. Sin embargo, volviendo a nuestra mirada hacia la Tierra, esto no lo podemos hacer, simplemente porque la luz no se propaga en estos medios. Por tanto, si quisiéramos conocer el interior de la Tierra, deberíamos buscar otro tipo de energía que sí se propague por el interior y, por tanto, que pudiéramos realizar el mismo proceso de aprendizaje que hacemos con la luz y nuestro cerebro. La comunidad científica descubrió que las ondas sísmicas son la mejor fuente de información del interior de la Tierra.

Las ondas sísmicas

Una onda sísmica¹ es una onda de tipo mecánico que se propaga en el interior de la Tierra como consecuencia de una liberación de energía debido a diferentes fenómenos: terremotos, explosiones, meteoritos, volcanes, etc. Estas ondas pueden ser longitudinales, porque su dirección de propagación es la misma que la de la perturbación del medio y se asemejan a las ondas de sonido; por este motivo, se las denomina ondas P (de *Pressure* y no de primarias). Existen otro tipo de ondas que son transversales a la dirección de propagación a las cuales se las denomina ondas S (de *Shear*, cizalla, y no secundarias) y que tienen un mecanismo de propagación parecido al de la luz. Nosotros estamos acostumbra-

dos a percibir este tipo de ondas no solo cuando ocurre un terremoto y nos sobresaltamos, o vemos sus daños, si no cuando, por ejemplo, percibimos la circulación de un camión o la vibración de unas obras cercanas. Estas ondas, no son más que la consecuencia de la propagación de una perturbación (figura 1). Así, si pensamos en el sonido, podemos identificar cuándo se rasga un papel, aplaudimos o escuchamos una olla a presión en la cocina. Nuestro cerebro es capaz de distinguir estos diferentes sonidos porque cada uno tiene una frecuencia y duración diferente.

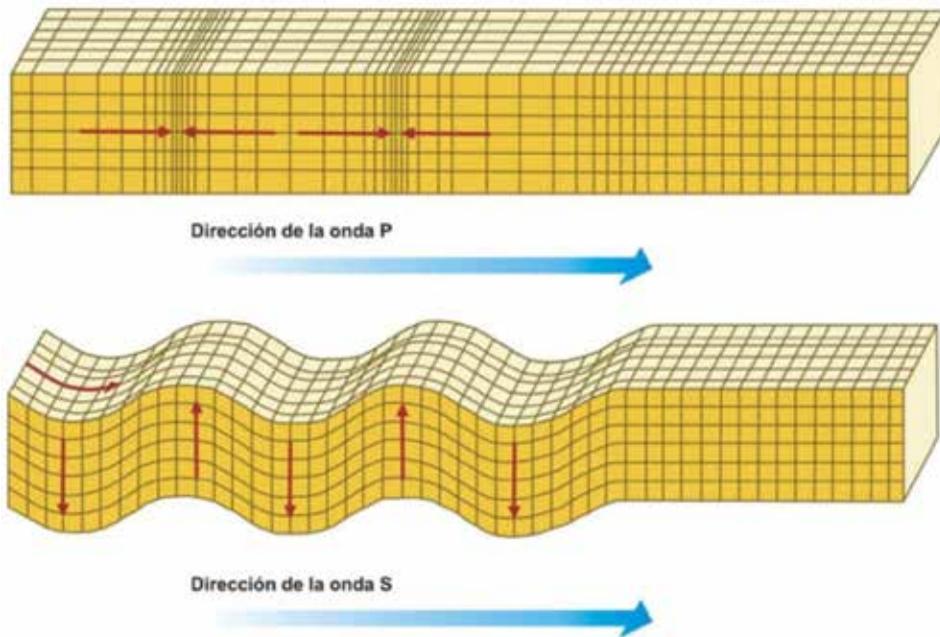


Figura 1. Un esquema de la propagación de las ondas sísmicas internas de tipo P y de tipo S

Una de las características más importantes y útiles para la comunidad científica es que la velocidad de estas ondas no es constante², si no depende del medio; fundamentalmente, de la rigidez y de la compresibilidad. Así, cuanto más rígido sea un material o más oposición ponga a poder ser comprimido, más rápidas viajarán las ondas sísmicas. A su vez, si el medio no ofrece resistencia a la compresibilidad las ondas no podrán viajar, como es el caso de las ondas S en los fluidos. ¿Qué puede hacer que un medio cambie de rigidez o compresibilidad? Evidentemente, una de las causas es su naturaleza, no es lo mismo, una barra de acero de alta rigidez que un trozo de madera. Pero también, el mismo material va a aumentar o disminuir su rigidez dependiendo de la presión a la que esté sometido.

Estas ondas, al igual que ocurre con la luz en nuestra atmósfera transparente, se reflejan en las heterogeneidades de la Tierra. De manera que pueden cambiar de dirección en su propagación, como la luz cuando rebota en cualquier objeto de nuestro entorno.

Por tanto, las ondas sísmicas en su recorrido por el interior sufren cambios en su contenido en frecuencia, velocidad y dirección. Los sismólogos han aprendido a aprovechar estas características para, de igual manera que nuestro cerebro las usa para identificar

objetos, conocer la estructura del interior de la Tierra. Existen numerosas técnicas que aprovechan estas propiedades y cada una de ellas suministra una información diferente. Así, las técnicas de reflexión³ y refracción⁴ sísmica nos dan información de la estructura de la Tierra en forma de capas superpuestas. El georadar⁵, que muchas veces lo hemos visto en reportajes de arqueología o búsquedas de tesoros, nos da información de la estructura más superficial de la Tierra, llegando a ser vital en los trabajos arqueológicos. La herramienta más potente de la que se dispone para obtener una imagen tridimensional del interior de la Tierra es la denominada tomografía sísmica⁶ que nos permite conocer desde la estructura de un volcán hasta el núcleo terrestre.

¿Qué es la tomografía sísmica?

Se conoce como *tomografía*⁷, a aquella técnica que permite procesar imágenes de un cuerpo por secciones (*tomos* del griego loncha y *grafos* del griego dibujos). Las imágenes que se deriven del procesado de esta energía sísmica se conocen como *tomogramas*. Será el sismómetro el instrumento que nos permita registrar la energía que se propaga desde el interior de la Tierra hacia la superficie. El procedimiento matemático que permite este proceso es la *reconstrucción tomográfica*. Este procedimiento se basa en comparar los tiempos de viaje de las ondas sísmicas desde su origen hasta el sismómetro de registro con un modelo teórico inicial o de partida. Pero también se puede comparar cuanta energía se pierde en esta propagación, o cómo cambia en contenido en frecuencia de las ondas. Por tanto, cuando hablamos de tomografía sísmica nos referimos a la técnica capaz de hacer “radiografías” de la estructura interna de la Tierra. Las imágenes resultantes pueden estar tanto en dos como en tres dimensiones y reflejan las anomalías que existen bajo la superficie terrestre. La precisión del modelo resultante depende en gran medida de la disponibilidad de datos sísmicos para su creación. Este es un procedimiento bastante moderno, que no empieza a emplearse hasta los años 70 del siglo XX; gracias a que se empiezan a analizar de forma exhaustiva y con una mayor potencia de cálculo los datos registrados en las estaciones sísmicas distribuidas a lo largo del mundo. La información obtenida a través de la tomografía sísmica sirve a los investigadores para mejorar sus conocimientos en ámbitos como:

Procesos del núcleo de la tierra
Tectónica de placas
*Análisis de zonas volcánicas*⁸

Como su propio nombre indica, la tomografía sísmica obtiene datos principalmente en zonas con actividad sísmica. Esto implica que en vastas regiones de la Tierra con menor actividad sísmica obtienen menos datos, por lo que los modelos gráficos que resultan de la tomografía son menos precisos que los que se muestran en otras zonas. Al obtener resultados gracias a los datos que se recogen de terremotos y eventos similares, la tomografía sísmica es dependiente de estos tipos de fuentes. Cuando no hay ocurrencia de terremotos, es posible generar de manera artificial estas señales sísmicas como usando explosiones (lo menos común) o hacer vibrar el suelo mediante burbuja de aire o camiones

vibradores. Cuando se usan terremotos se denomina tomografía sísmica *pasiva* y cuando se generan señales artificiales tomografía sísmica *activa*.

Pero, ¿qué es una anomalía? Hemos comentado que la tomografía se basa en la detección de anomalías o heterogeneidades en el interior de la Tierra. Una anomalía no es más que una estructura geológica que posee propiedades físicas y químicas diferentes a las de su entorno y que afectan a la propagación de las ondas sísmicas cambiando su velocidad, su dirección o absorbiendo más o menos energía que el entorno⁹. Por tanto, cuando decidimos que en una tomografía comparamos con un modelo, lo que hacemos es asumir unas características iniciales del interior de la Tierra; en función de los adelantos o retrasos de los tiempos de llegada o de la mayor o menor energía absorbida, los resultados se interpretan en base a diferentes características geológicas. Así, si una onda llega más rápidamente, asumimos que el medio es más rígido o más frío y podemos asignar un tipo de roca compacta. Por el contrario, si las ondas llegan más tarde, podemos asumir que el medio es menos rígido o incluso caliente, dando lugar a considerar que hay magma durante ese recorrido.

Tomografía sísmica en volcanes

Basándonos en este conocimiento, nuestro grupo de la Universidad de Granada ha realizado diversas tomografías sísmicas en velocidad y atenuación, en diferentes volcanes activos alrededor del mundo. Son muchos los volcanes estudiados pero destacando algunos de ellos tenemos: La Palma, El Hierro¹⁰ y Tenerife^{11,12} en las islas Canarias; Mt. Etna¹³⁻¹⁶, Estromboli¹⁷ y las Islas Eolias¹⁸ en Italia; Usu¹⁹ y Asama²⁰ en Japón; Isla Decepción²¹⁻²³ en la Antártida; Fogo y Furnas²⁴ en las islas Azores; Long Valley²⁵ en EEUU; Montserrat en el Caribe, y otros más. El conocimiento de la estructura del interior de los volcanes es crucial para modelar con éxito la dinámica volcánica y para informar sobre protocolos de alerta temprana de una erupción. Nuestro grupo es un grupo internacional en el que de manera continuada participan instituciones de España, Italia, Alemania, Reino Unido, Rusia, Estados Unidos o Japón, entre otros países, siendo, probablemente, uno de los de mayor prestigio en el mundo. Uno de los logros más importantes es estudiar esta estructura interna analizando cómo se pierde energía, lo que hemos denominado atenuación sísmica. Esta estructura de atenuación puede asociarse con diferentes propiedades geológicas, incluido el número y la extensión de las fracturas, la complejidad estructural o la presencia de heterogeneidades (p. ej., cambios pequeños y abruptos de densidad y/o velocidad que influyen en los fenómenos de dispersión) y propiedades reológicas (p. ej., estados térmicos de las rocas) y la tasa de consolidación, que contribuyen a la absorción inelástica. Como se ha comentado anteriormente, no siempre ha sido posible tener a disposición terremotos que pudieran generar esta energía, por lo que también hemos realizado grandes campañas científicas en lugares emblemáticos de la Tierra como las Islas Canarias, las islas Azores, el volcán Etna, las islas Eolias o incluso en la Antártida (figura 2). En estas campañas se han utilizado buques oceanográficos españoles como el Hespérides o el Sarmiento de Gamboa, italiano como el Galatea o griegos como el Aegaeon para generar estas señales artificiales. En este caso fueron compresores de aire comprimido

que generaban una burbuja de aire en la superficie del mar, que propagándose hacia el fondo marino generaban finalmente ondas sísmicas.

Nuestros trabajos se basan en buscar aquellas estructuras geológicas que presenten las menores velocidades de propagación posibles o las de mayor pérdida de energía, con el fin de determinar dónde puede haber magma y cómo de peligroso puede ser para la población. A su vez, también hemos estudiado también volcanes en plena erupción, como es el caso de la erupción de La Palma, para poder entender la dinámica eruptiva y potencialmente poder incidir cuando podría haber acabado. De entre los numerosos volcanes en los que hemos trabajado, aquí vamos a presentar 3 ejemplos muy diferentes entre sí que nos permiten entender la estructura de los volcanes: la caldera de Long Valley (EEUU), donde sin haber erupción existe un alto nivel de riesgo a escala global, el volcán Mt. Etna (Italia) que es el más activo e importante de Europa o la más reciente erupción de La Palma (Islas Canarias, España).

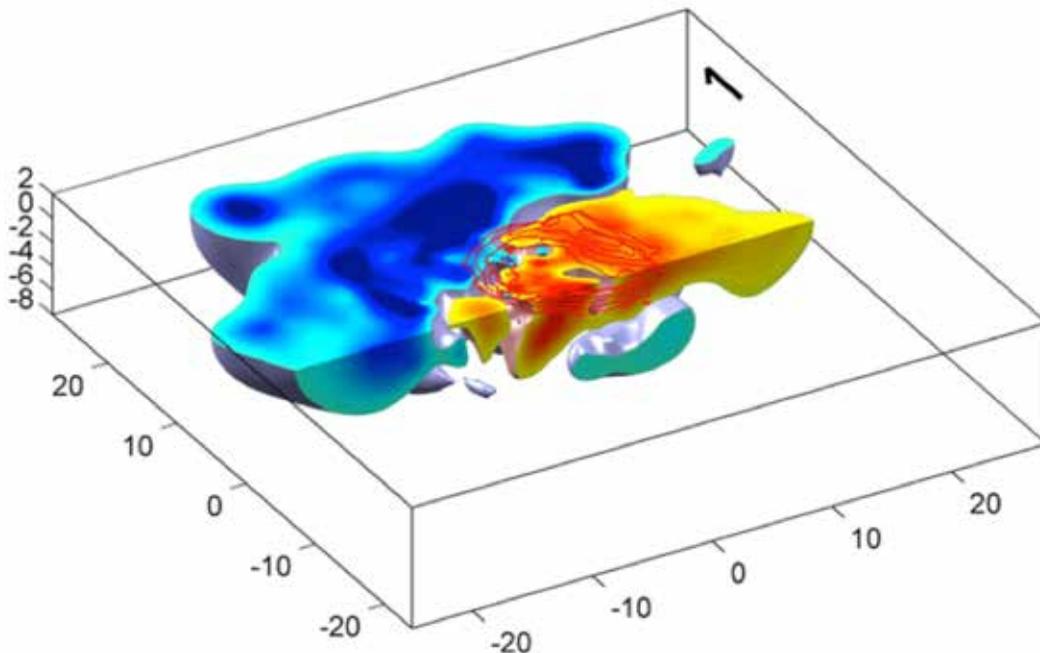


Figura 2. Imagen tomográfica de la Isla Decepción (Antártida). Los colores representan las diferentes velocidades de propagación sísmica, siendo los colores fríos (azules) representativos de alta velocidad, y por tanto estructuras geológicas más consolidadas, y los colores cálidos (rojos) cuerpos de menor velocidad y por tanto asociados a la presencia de magma en la región.

La caldera de Long Valley (EEUU)

Esta caldera volcánica situada en el norte de California y con unos 40 km de diámetro ha sido la responsable de algunas de las erupciones más significativas de los últimos miles de años. Nuestro equipo, obtuvo una imagen tridimensional de atenuación de la caldera después de que una serie sísmica y un resurgimiento del terreno hicieran pensar en una posible erupción con consecuencias en el clima de la Tierra (figura 3).

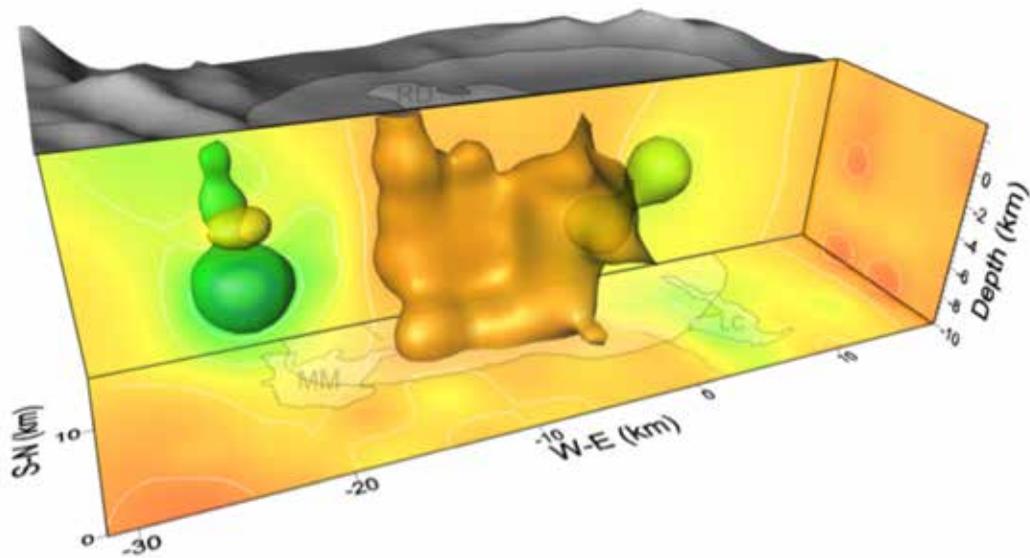


Figura 3. Imagen tridimensional en atenuación de la caldera de Long Valley. Los colores fríos (verdes) reflejan estructuras más consolidadas que se asocian con antiguas erupciones. Los colores cálidos (amarillos y naranjas) fueron interpretados como una acumulación gaseosa de origen magmático.

Es más, cuando ocurrió esta reactivación en la caldera de Long Valley (California) la gran duda de la comunidad científica fue atribuir este cambio o deformación del terreno y la alta tasa de terremotos o bien al ascenso de fluidos hidrotermales (vapor de agua, u otros gases magmáticos) o que se estaba produciendo una recarga de magma. La diferencia es fundamental para evaluar el peligro volcánico regional y mundial. Después de analizar más de 2500 terremotos nuestras observaciones implican que la región de alta atenuación (marcada en amarillos en la figura 3) no está asociada a un gran cuerpo de magma a poca profundidad. Pero nuestra resolución nos permitió ir más profundamente y tampoco tenemos imágenes de ningún cuerpo aislado de alta atenuación en los primeros 8 km superiores de la Corteza terrestre (que serían evidencia clara de cuerpos parcialmente fundidos, u otros cuerpos de magma), por lo que descartamos presencia de magma. Esta zona al final es identificada como una intrusión de gas CO_2 que tiene origen magmático, pero mucho más profundo por lo que se descartó que hubiera un peligro a corto o medio plazo de una erupción en la zona.

El volcán Mt. Etna (Italia)

La región del Monte Etna es un entorno dinámico en el que se observan continuos cambios estructurales asociados a diferentes etapas volcánicas, es decir, es un volcán en continuado cambio, tanto en su morfología como en las formas de tener erupciones.

El monte Etna es uno de los laboratorios naturales más fascinantes para estudiar la estructura profunda de un volcán activo usando tomografía sísmica, sea cual sea la naturaleza, de velocidad o atenuación. Es un volcán poligenético de 3300 m de altura, situado en la costa este de Sicilia. Las dinámicas eruptivas del monte Etna son el resultado de una interacción compleja entre magma a través de un complejo sistema de alimentación

y conducciones, el régimen tectónico regional (corteza profunda) y las estructuras locales (corteza poco profunda y sobre todo el edificio volcánico), parcialmente controladas por derrumbes, inestabilidad de laderas y creación de nuevas bocas eruptivas. Las condiciones de ascenso del magma y las razones por las que asciende magma en ese lugar (p. ej., configuración estructural, fuerzas tectónicas) aún no se comprenden por completo. Por tanto determinar la ubicación y el tamaño de los posibles emplazamientos de magma cerca de la superficie es crucial para limitar el tamaño de futuras erupciones o la frecuencia eruptiva. La acumulación de magma y la migración del material fundido han sido el foco de nuestra investigación en el volcán del Monte Etna. Paradójicamente hasta nuestra investigación todos los esfuerzos para localizar dónde estaba el magma que alimentaba las erupciones del Mt. Etna resultaron infructuosos.

Nuestro grupo ha realizado la más moderna y completa imagen tridimensional (3D) de velocidad y atenuación debajo del volcán Mt. Etna y la ha interpretado combinando experiencias de trabajos previos (Figura 4).

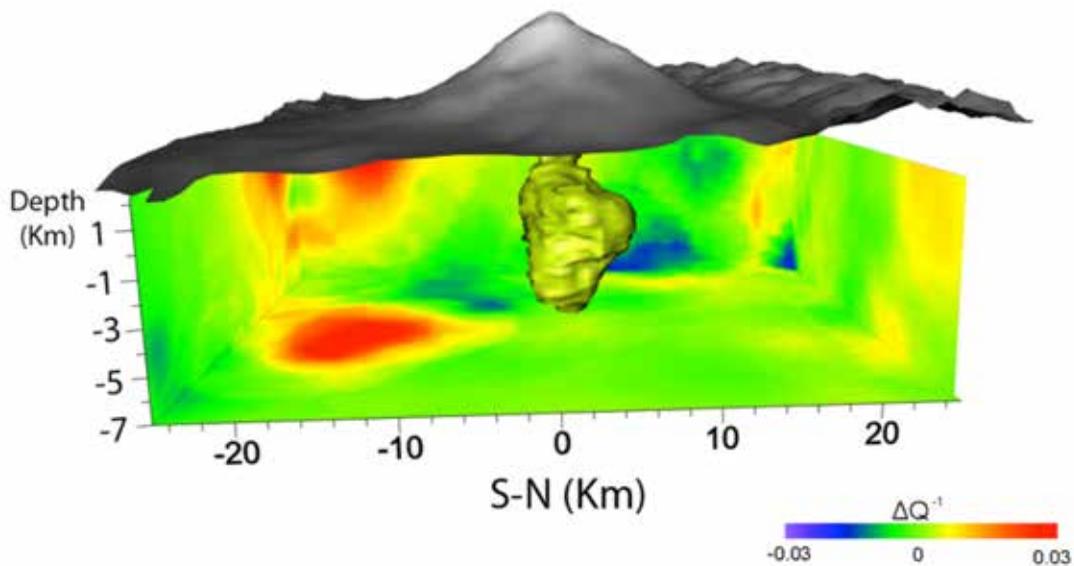


Figura 4. Imagen tridimensional de atenuación bajo el volcán Mt. Etna, Utilizando similares códigos de colores que en los casos anteriores el color amarillo refleja la zona bajo el volcán, con muy alta atenuación y que se asocia a la presencia de un gran almacén de magma bajo el volcán.

Nuestro trabajo refleja que bajo el volcán Mt. Etna existe una gran acumulación de magma o material fundido que va desde la superficie de la corteza hasta una profundidad de unos 4 km debajo de ella. Esta material superficial es el responsable de alimentar las continuas erupciones que desde el año 2000 están produciéndose en este volcán. El gran volumen de este material almacenado evidencia que por ahora esta alta tasa de procesos eruptivos cíclicos en el volcán Mt. Etna durará un periodo aún más largo. A pesar de estos avances aún hay muchas preguntas por responder, como por ejemplo, de dónde viene este magma que llega a la superficie. Para ello aún se deberá esperar a tener muchos más terremotos en la región que nos “iluminen” tomográficamente el interior de la Tierra,

Erupción en La Palma (Islas Canarias, España).

El 19 de septiembre de 2021 se inició en la isla de La Palma, Islas Canarias, España, una erupción de alto impacto social y científico que se prolongó durante casi tres meses hasta el 13 de diciembre de 2021. Hasta la fecha no ha habido víctimas mortales, pero la erupción destruyó miles de hogares, interrumpió las redes de transporte y comunicación y afectó extensas áreas de tierras de cultivo que son clave para la economía local. El interés de los medios ha sido alto, con visitas continuadas de autoridades e incluso una cámara de Televisión Canaria emitiendo las 24 horas del día todas las imágenes de este proceso eruptivo. En menos de tres meses, esta erupción de fisura formó un campo de lava de > 12 km² con espesores de hasta decenas de metros. Entre las siete erupciones anteriores en La Palma en los últimos 500 años, esta erupción formó un campo de lava de tan solo 4,4 km². El estilo eruptivo ha sido principalmente efusivo, pero con numerosas explosiones estrombolianas y colapsos parciales del cono. La actividad sísmica intensa e inusual antes y durante la erupción ha incluido decenas de miles de terremotos alguno de los cuales con magnitudes altas para este tipo de volcán (hasta Ml = 4.3).

Hasta esta erupción todas las tomografías sísmicas se realizaron mucho tiempo después de que terminara la erupción, la tomografía sin-eruptiva (es decir, durante la erupción) no se había hecho antes con éxito. Por primera vez, obtuvimos imágenes de alta resolución del interior de la Tierra durante una erupción volcánica en curso. Utilizamos datos de 11.349 terremotos para realizar una tomografía sísmica de velocidad de las ondas sísmicas. El objetivo era entender por qué estaba teniendo lugar esa erupción y cuál era el camino seguido por el magma desde el Manto hasta la superficie. En la Figura 5 mostramos nuestras imágenes tomográficas de la zona.

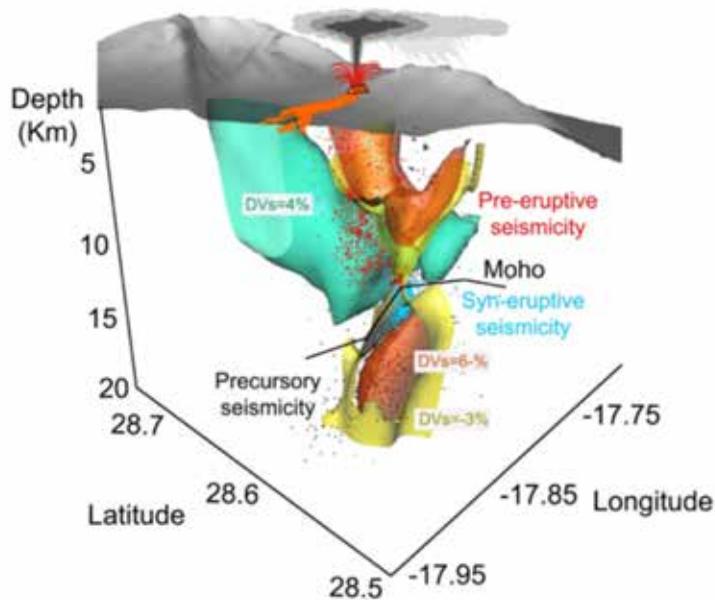


Figura 5. Imagen tridimensional de la estructura de la Tierra bajo la isla de La Palma durante su proceso eruptivo del año 2021. Los colores fríos representan la estructura consolidada, los cálidos o bien la presencia de magma, o bien materiales altamente fracturados y alterados. Los puntos representan los terremotos usados para este estudio.

Identificamos tres estructuras distintas debajo de la zona eruptiva: (1) una región superficial localizada (< 3 km) de alteración hidrotermal, es decir una zona en donde el calor de antiguas erupciones interaccionaba con el agua y rompía el terreno más superficial haciéndolo menos resistente; (2) corteza oceánica espacialmente extensa, consolidada, que se extiende hasta ~ 10 km de profundidad y; (3) una gran intrusión de volumen de roca llena de magma subcortical (> 400 km³) que se extiende desde ~ 7 a 25 km de profundidad. Nuestros resultados sugieren que este gran reservorio de magma alimenta la erupción de La Palma de forma continua durante casi tres meses. Antes del inicio de la erupción, el magma ascendió desde ~ 10 km de profundidad a la superficie en < 7 días. En los 3 km superiores, la migración del material fundido ocurre a lo largo del contacto occidental entre la corteza oceánica consolidada y el material hidrotermal alterado. La existencia de otras debilidades estructurales similares a lo largo del contacto oriental de la Isla de la Palma podrían potencialmente causar nuevos centros eruptivos en el futuro, es decir nuevas erupciones y no precisamente al lado de donde ha ocurrido la última erupción.

Nuestras imágenes tomográficas en 3D, nos han permitido desarrollar un modelo de la actividad volcánica en curso en La Palma pero remontándonos a años antes de la erupción. Entre diciembre de 2017 y agosto de 2021, al menos 9 enjambres de terremotos (que produjeron ~ 700 terremotos bien localizados) propiciaron unas sucesivas inyecciones de magma desde el manto hasta la base de la corteza oceánica debajo del volcán Cumbre Vieja (el lugar de todas las erupciones históricas, incluida la actividad actual) causando la acumulación de un gran volumen de roca llena de magma (> 400 km³). Después de un mes de inactividad sísmica, en los 7 días previos al inicio de la erupción (14:00 UTC del 19 de septiembre), el magma ascendió rápidamente desde 10 km sobre el nivel del mar (es decir, la base del Moho) hasta la superficie a lo largo de una zona de debilidad estructural delineada por una anomalía tomográfica de baja velocidad asociada a la sismicidad ocurrida unos meses antes. A pesar de la naturaleza altamente fracturada y quebradiza de la zona hidrotermal, que teóricamente ofrece baja resistencia al ascenso del magma, planteamos la hipótesis de que la zona de contacto debe presentar una resistencia mecánica aún menor, lo que es consistente con las pequeñas magnitudes de los sismos en las horas previas a la erupción.

Dado el gran tamaño de la intrusión de magma que alimentó la erupción volcánica no es posible descartar que este sistema magmático pueda provocar futuras erupciones volcánicas en la Isla de La Palma en un futuro cercano.

Referencias.

- 1.- Ben-Menahem, A., & Singh, S. J. (2012). *Seismic waves and sources*. Springer Science & Business Media.
- 2.- Kennett, B. (2009). *Seismic wave propagation in stratified media* (p. 288). ANU Press.
- 3.- Zelt, C. A., Sain, K., Naumenko, J. V., & Sawyer, D. S. (2003). Assessment of crustal velocity models using seismic refraction and reflection tomography. *Geophysical Journal International*, 153(3), 609-626.

- 4.- Palmer, D. (1981). An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Geophysics*, 46(11), 1508-1518.
- 5.- Lehmann, F., & Green, A. G. (1999). Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions. *Geophysics*, 64(3), 719-731.
- 6.- Anderson, D. L., & Dziewonski, A. M. (1984). Seismic tomography. *Scientific American*, 251(4), 60-71.
- 7.- Lo, T. W., & Inderwiesen, P. L. (1994). *Fundamentals of seismic tomography*. Society of Exploration Geophysicists.
- 8.- Koulakov, I., & Shapiro, N. (2015). Seismic tomography of volcanoes. *Encyclopedia of earthquake engineering*, 15(1), 1-18.
- 9.- Lees, J. M. (2007). Seismic tomography of magmatic systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167(1-4), 37-56.
- 10.- García-Yeguas, A., Ibáñez, J. M., Koulakov, I., Jakovlev, A., Romero-Ruiz, M. C., & Prudencio, J. (2014). Seismic tomography model reveals mantle magma sources of recent volcanic activity at El Hierro Island (Canary Islands, Spain). *Geophysical Journal International*, 199(3), 1739-1750.
- 11.- García-Yeguas, A., Koulakov, I., Ibáñez, J. M., & Rietbrock, A. (2012). High resolution 3D P wave velocity structure beneath Tenerife Island (Canary Islands, Spain) based on tomographic inversion of active-source data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B9).
- 12.- Prudencio, J., Ibáñez, J. M., Del Pezzo, E., Martí, J., García-Yeguas, A., & De Siena, L. (2015). 3D attenuation tomography of the volcanic island of Tenerife (Canary Islands). *Surveys in Geophysics*, 36(5), 693-716.
- 13.- Díaz-Moreno, A., Barberi, G., Cocina, O., Koulakov, I., Scarfi, L., Zuccarello, L., ... & Ibáñez, J. M. (2018). New insights on Mt. Etna's crust and relationship with the regional tectonic framework from joint active and passive P-wave seismic tomography. *Surveys in geophysics*, 39(1), 57-97.
- 14.- Martínez-Arévalo, C., Patané, D., Rietbrock, A., & Ibáñez, J. M. (2005). The intrusive process leading to the Mt. Etna 2001 flank eruption: Constraints from 3-D attenuation tomography. *Geophysical Research Letters*, 32(21).
- 15.- Castro-Melgar, I., Prudencio, J., Del Pezzo, E., Giampiccolo, E., & Ibanez, J. M. (2021). Shallow magma storage beneath Mt. Etna: Evidence from new attenuation tomography and existing velocity models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(7), e2021JB022094.
- 16.- Giampiccolo, E., Del Pezzo, E., Tuvè, T., Di Grazia, G., & Ibanez, J. M. (2021). 3-D Q-coda attenuation structure at Mt Etna (Italy). *Geophysical Journal International*, 227(1), 544-558.
- 17.- Prudencio, J., Del Pezzo, E., Ibáñez, J. M., Giampiccolo, E., & Patané, D. (2015). Two-dimensional seismic attenuation images of Stromboli Island using active data. *Geophysical Research Letters*, 42(6), 1717-1724.
- 18.- Castro Melgar, I., Prudencio Soñora, J., Del Pezzo, E., & Ibáñez Godoy, J. M. (2021). Small-scale volcanic structures of the Aeolian volcanic arc revealed by seismic attenuation.

- 19.- Prudencio, J., Taira, T., Aoki, Y., Aoyama, H., & Onizawa, S. (2017). Intrinsic and scattering attenuation images of Usu volcano, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 79(4), 1-12.
- 20.- Prudencio, J., Aoki, Y., Takeo, M., Ibáñez, J. M., Del Pezzo, E., & Song, W. (2017). Separation of scattering and intrinsic attenuation at Asama volcano (Japan): Evidence of high volcanic structural contrasts. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 333, 96-103.
- 21.- Zandomenighi, D., Barclay, A., Almendros, J., Ibañez Godoy, J. M., Wilcock, W. S., & Ben-Zvi, T. (2009). Crustal structure of Deception Island volcano from P wave seismic tomography: Tectonic and volcanic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 114(B6).
- 22.- Prudencio, J., De Siena, L., Ibáñez, J. M., Del Pezzo, E., Garcia-Yeguas, A., & Diaz-Moreno, A. (2015). The 3D attenuation structure of deception Island (Antarctica). *Surveys in Geophysics*, 36(3), 371-390.
- 23.- Prudencio, J., Ibáñez, J. M., García-Yeguas, A., Del Pezzo, E., & Posadas, A. M. (2013). Spatial distribution of intrinsic and scattering seismic attenuation in active volcanic islands—II: deception Island images. *Geophysical Journal International*, 195(3), 1957-1969.
- 24.- Zandomenighi, D., Almendros, J., Ibáñez, J. M., & Saccorotti, G. (2008). Seismic tomography of Central São Miguel, Azores. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 167(1-2), 8-18.
- 25.- Prudencio, J., & Manga, M. (2020). 3-D seismic attenuation structure of Long Valley caldera: looking for melt bodies in the shallow crust. *Geophysical Journal International*, 220(3), 1677-1686.

Los volcanes en la historia de la humanidad

Jesús M. Ibáñez^{1,2,}, Mauricio Bretón^{3,&}*

1) Departamento de Física Teórica y del Cosmos. Área de Física de la Tierra. Avd. Fuentenueva s/n. Universidad de Granada. 18071. Granada. España.

2) Instituto Andaluz de Geofísica, Campus de Cartuja. Universidad de Granada. C/Profesor Clavera 12. 18071. Granada. España.

3) Centro de Estudios Volcanológicos. Observatorio Volcanológico de la Universidad de Colima, México. Gonzalo de Sandoval 333, las Víboras. 28045, Colima, México.

* Jesús M. Ibáñez (jibanez@ugr.es)

& Mauricio Bretón (mauri@ucol.mx)

Los volcanes son uno de los fenómenos naturales de la Tierra, es decir, de los procesos físicos que ocurren en el interior y superficie de la Tierra, que más han modelado su superficie, su clima, su biodiversidad y por ende la evolución de la especie humana. Gran parte del agua que existe en la Tierra es debida a los procesos eruptivos, pero también muchas de las grandes extinciones en masa acontecidas varias veces en la Historia de la Tierra han tenido su origen en grandes procesos volcánicos. La segunda gran extinción en masa acontecida hace unos 443 millones de años denominada Extinción Ordovícica-Silúrica¹ pudo tener como uno de los desencadenantes grandes erupciones volcánicas. Pero otra como la datada hace unos 252 millones de años conocida como Extinción Pérmica-Triásica² está asociada a procesos volcánicos muy energéticos que cubrieron la actual Siberia entre otras grandes extensiones y prácticamente destruyó el 85% de la vida. Antes de la última gran extinción (la muy nombrada y popular como la extinción del Cretácico³, o desaparición de los dinosaurios hace 66 millones de años), otra gran extinción en masa hace unos 200 millones de años, y conocida como Extinción Triásica-Jurásica⁴, dio precisamente lugar a la aparición de los dinosaurios y también estuvo propiciada por grandes erupciones. Durante el corto periodo de tiempo en el que el hombre es especie también los volcanes han estado presentes y ello ha ido modelando la propia conducta, hábitos migraciones e incluso creencias religiosas, lo que pone en evidencia la gran vulnerabilidad de la raza humana frente a este hecho volcánico. Sin embargo en los últimos años en donde la inmediatez de la noticia, donde lo acontecido hace dos días deja de ser noticia, y donde se han cambiado las prioridades incluso en el concepto de relaciones humanas se está olvidando esta gran influencia de los volcanes. En este artículo se ha de realizar una rápida revisión de algunos de los muchos episodios de la Historia de la Humanidad^{5,6} en donde el fenómeno volcánico ha sido clave para entender lo que ha sucedido y que muchas veces es olvidado.

La percepción actual del fenómeno volcánico.

Debemos empezar afirmando que es un error generalizar los conceptos asociados a la percepción humana frente a cualquier fenómeno, pero en este apartado cometeremos este error basado en nuestra experiencia y sobre todo en la de otros investigadores sociólogos y psicólogos que trabajan sobre el tema⁷. Por tanto, comenzamos afirmando que para la gran parte de la sociedad actual el fenómeno volcánico es algo lejano a nuestra vida cotidiana, que “le afecta a otros”, y que aparte de ser espectacular en las imágenes de vemos en los medios de comunicación y redes sociales, es algo que “no nos preocupa ni nos preocupará”. Para ello podemos poner como ejemplo la reciente erupción de la isla de La Palma ocurrida entre septiembre y diciembre del año 2021. Esta erupción podemos calificarla como la más mediática en la historia de la Humanidad. La Radio Televisión Canaria tenía un canal de TV online enfocando las 24 horas del día que durante esos meses era accedido por miles de personas a diario desde todo el mundo. Las visitas de autoridades (rey, presidente del gobierno, ministros o líderes políticos nacionales y regionales) eran tan numerosas que a veces era más noticia la presencia de estas autoridades que la propia erupción. Sin embargo, una vez finalizada la erupción el 13 de diciembre de 2021 el interés se desvaneció. Las prometidas ayudas no llegan como deben, o simplemente no llegan, la solidaridad ha dejado de continuar, y el interés por la población afectada y su bienestar se limita en el mejor de los casos a una escala regional o incluso insular, y eso sin que haya pasado más de 6 meses desde el final de la erupción.

Si preguntamos por la calle por otras erupciones recientes nos podríamos sorprender de los pocos nombres que se nos da, puede que sea el Etna el volcán más nombrado, pero en general poco más. Ya poca gente recuerda la erupción del volcán Eyjafjallajökull de Islandia del año 2010. No porque tenga un nombre impronunciable, porque se puede decir eso “de ese volcán islandés de nombre raro”, sino porque ya han pasado 12 años desde esta erupción. Sin embargo esta erupción produjo un colapso en el tráfico aéreo en el hemisferio norte que llegó a cancelar todos los vuelos por cerca de un mes, atrapó a miles de personas, se perdieron mercancías y afectó económicamente a muchos países europeos. Recordemos como miles de turistas británicos no podían llegar a su país, y eran llevados hasta puertos del norte de España y embarcados en decenas de barcos expresamente fletados para ello. Sin embargo, como este efecto sólo duró un mes debido al cambio de los vientos, esta erupción ha quedado en el olvido, a pesar de haber demostrado nuestra alta vulnerabilidad económica y tecnológica frente al fenómeno volcánico. Podríamos repasar otras erupciones recientes, de los últimos años, incluida la del volcán Pinatubo en el año 1991 (la más grande del siglo XX), y el resultado sería el mismo, se nos ha olvidado o no pensamos que haya afectado mucho, “¿y a cuanta gente dice usted que mató?”.

Podríamos decir que como en España no hay muchos volcanes, salvo en Canarias donde las erupciones ocurren cada 25 o 30 años, esta concepción del fenómeno volcánico, su influencia y nuestra vulnerabilidad es baja; hay más fenómenos naturales que puedan preocuparnos. Nuestra experiencia trabajando con escolares de 2º y 5º de primaria nos está llevando a la conclusión de que esta despreocupación sobre el fenómeno volcánico es global. Nuestro grupo de trabajo ha realizado encuestas a centenares de niños y niñas de 7 y 10 años en donde se les pedía que pintaran un volcán y describieran el fenómeno

volcánico a través de preguntas simples y directas. Este estudio se ha realizado en España (incluyendo Canarias o Granada), Italia, México, Japón, EEUU, Argentina o Nicaragua, entre otros países. Las primeras conclusiones de este largo trabajo aún por ser finalizado es que en todos los lugares la percepción es similar, los volcanes son algo lejano a ellos, incluso si viven en las inmediaciones de un volcán activo. Pero, ¿de verdad el fenómeno volcánico está tan alejado de nuestra vida cotidiana?

Los volcanes en nuestra vida y costumbres.

Los volcanes, y el fenómeno volcánico, están presentes en nuestra vida mucho más de lo que en un principio podríamos pensar: arte, gastronomía, vocablos pero también en nuestras creencias y costumbres⁸⁻¹¹. Pensemos en la palabra vulcanizar, el hecho de transformar el caucho en goma, por ejemplo para las ruedas. Se realiza mezclando el caucho con azufre que fundamentalmente se recoge en los volcanes.

Se hace turismo volcánico^{10,12}. En España tenemos visitas al parque Nacional de Timanfaya en Lanzarote o las Cañadas del Teide en Tenerife para ver paisajes volcánicos; cenamos u oímos conciertos en los Jameos del agua en Lanzarote, un túnel lávico, visitamos el lago de Bañolas en Gerona, visitamos Campo de Calatrava en Ciudad Real o visitamos el Cabo de Gata o las costas del este de Almería, y a veces ni nos damos cuenta que son paisajes volcánicos. Islandia es un destino de moda y bañarse en las aguas sulfurosas del Blue Lagoon uno de los principales atractivos. Subir al Kilimanjaro o al Aconcagua o cualquier otro volcán es un atractivo a los caminantes extremos. Apuntamos en nuestra mente, “si tengo dinero quiero ir a visitar Yellowstone en EEUU. Es posible seguir enunciando otros destinos turísticos similares o más atractivos (Figura 1).



Figura 1. Algunos ejemplos del turismo volcánico.

La gastronomía también tiene influencias de los volcanes¹². Empezando por la gran fertilidad de los terrenos volcánicos, y de las aguas que circundan a los volcanes. La región de la Campania en Italia que rodea al volcán Vesubio y al complejo volcánico de Campi Flegrei es una de las regiones más fértiles de Europa, de igual manera que los campos sicilianos que rodean al volcán Etna. Esta fertilidad ha dominado a la cocina tradicional italiana, que no sólo vive de la pizza o la pasta. Las grandes terrazas arroceras de Indonesia o Filipinas son la combinación rica del agua y las cenizas de los volcanes que los rodean. El tequila es una bebida que se destila del agave y que requiere campos volcánicos para su crecimiento. En casi todas las regiones volcánicas del mundo, desde Nueva Zelanda a las Azores, pasando por Centro América hay una forma común de cocinar en volcanes: hacer un agujero en el suelo caliente y enterrar la comida que se desea cocinar envuelta en hojas de plantas, sacos húmedos o cacerolas, taparlas y dejarlas cocer a fuego lento del calor del volcán. En Timanfaya podemos comer a la brasa al calor del volcán. Los ejemplos son innumerables (Figura 2) e incluso la forma de dulces de chocolate o la presentación de los propios tacos mexicanos. Si empezamos a pensar en más ejemplos vamos descubriendo que esta influencia es mayor que lo que pensábamos.

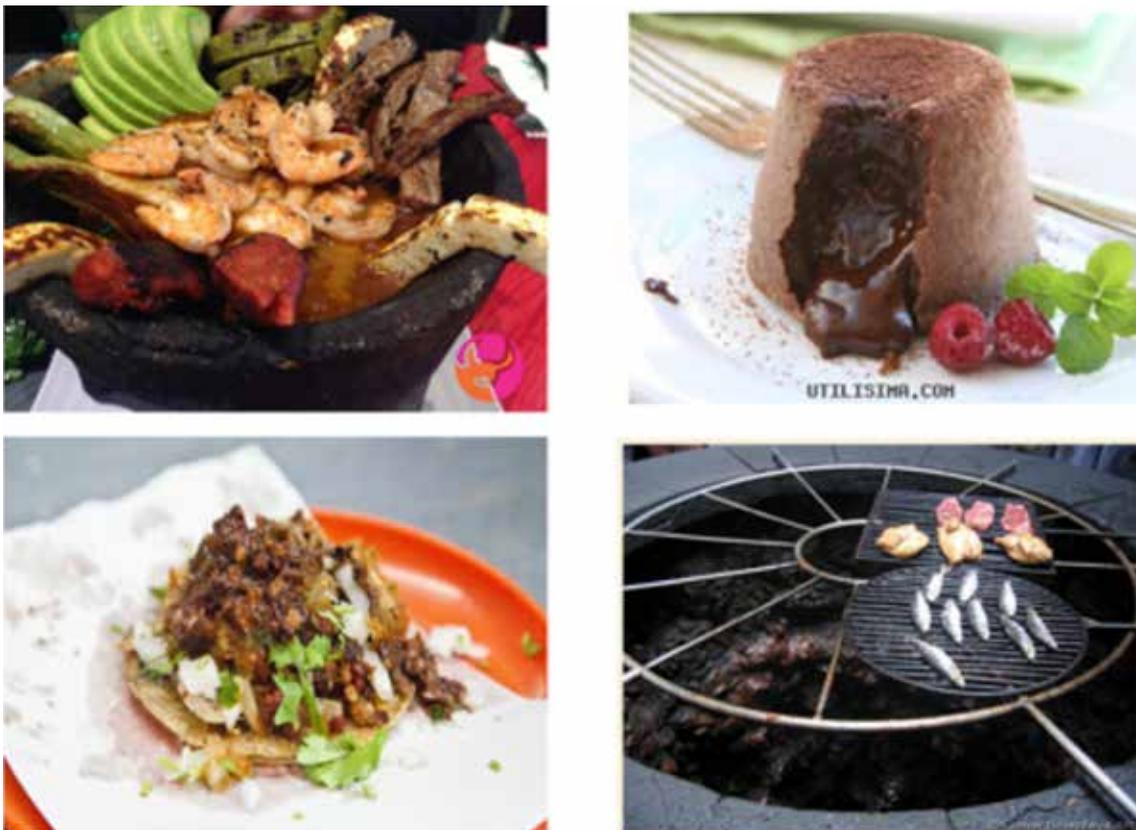


Figura 2. Algunos ejemplos gastronómicos de la influencia de los volcanes.

Las creencias religiosas también han recibido las influencias de los volcanes¹³. A lo largo de todo el mundo todas las culturas han situado a los dioses como responsables de los volcanes, o han usado a los volcanes para demostrar su ira o su alegría frente al hombre. En Hawái la diosa Pele domina a los volcanes, y un tipo de productos volcánicos, gotitas

de lava, las llaman lágrimas de Pele, o filamentos de lava en forma de cabello son denominados cabellos de Pele. En Canarias el Teide era denominado Guayota por los guanches, y era una deidad maligna que castigaba a los pobladores, es decir las erupciones volcánicas eran consideradas un castigo divino. Vulcano, el dios romano del fuego, habitaba en la isla del mismo nombre al norte de Sicilia dio el nombre universal a estas montañas que echan humo, piedras y fuego. Los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl que rodean a la ciudad de México tienen su propia mitología y leyenda entre romántica, de castigo, de lealtad por amor, y con presencia divina que en muchos aspectos recuerda algunos textos clásicos griegos. Pero la propia Biblia y algunos de sus relatos tienen una relación directa entre volcanes y Dios. Moisés recibe las tablas de la Ley en el monte Sinaí, un volcán al sur de la Península del Sinaí, donde el fuego humeante se identifica con un campo de fumarolas. Las plagas de Egipto y la apertura del mar ante Moisés se pueden explicar como una consecuencia de la erupción de la isla griega de Thera, la actual Santorini. Esta erupción da pie también al mito de la Atlántida. Este mismo concepto de dignidad o creencia divina también se extiende a los llamados “espíritus nacionales” y numerosos países tienen en sus escudos nacionales volcanes como símbolos de su espíritu patrio (Figura 3).



Figura 3. Ejemplos de presencia de volcanes en los escudos de algunos países.

Es posible añadir más influencias de los volcanes en nuestra vida, se presentan en monedas, billetes (recordemos el viejo billete de 1000 pesetas), sellos de correos, camisetas, joyas (diamante, olivino, obsidiana, etc.), bebidas, o incluso la puzolana de escapa de los circuitos de carreras están basados en material volcánico. Recordemos que la obsidiana, como vidrio volcánico muy resistente y fácil de tallar, utilizado por el hombre para hacer cuchillos, puntas de flecha, de lanza y muchos más utensilios, siendo clave junto al sílex para el desarrollo de la humanidad.

No todas las sociedades ven este proceso de la misma manera⁸. Dos ejemplos contrapuestos es la percepción de la cultura japonesa y la de la cultura mediterránea. En Japón, donde los volcanes son muy numerosos y han producido también muchos daños, son concebidos como “amigos”. De hecho al volcán Monte Fuji se le llama Fuji-san, donde la partícula “san” en japonés se usa para denominar a un amigo. Consideran que los volcanes les dan abundancia, fertilidad y recursos naturales. En la cultura Mediterránea los volcanes son el refugio del mal, o del castigo. En el Antiguo Testamento¹⁴⁻¹⁶, cuando Dios se enfada con su pueblo los males que llegan son todos basados en descripciones de fenómenos volcánicos o de terremotos. La historia de Sodoma y Gomorra tiene descripciones netamente asociadas a flujos piroclásticos volcánicos. Es más, nuestro infierno huele a azufre, es fuego eterno en cavidades el interior de la Tierra, e incluso Dante sitúa en su Divina Comedia el infierno dentro de un volcán. Hablamos de desastre, es decir, los astros o los dioses han dejado de acompañarnos.

Resulta evidente que también los volcanes han influido en la historia, a veces, como veremos en las siguientes secciones de manera dramática, provocando hambrunas, movimientos migratorios en masa, revoluciones, pero también ayudando a crear imperios. El ejemplo más evidente en este sentido es el llamado hormigón romano¹⁷. Los romanos cambiaron la forma y velocidad de construir gracias al hormigón, el que estamos tan familiarizados en nuestros edificios. Pero los romanos tenían un secreto para construir el mejor y más resistente hormigón jamás usado: se mezclaba con ceniza volcánica. El entorno de la ciudad de Roma son conos volcánicos relativamente recientes, unos pocos miles de años desde su última erupción, y además hay volcanes al sur el volcán Vesubio y Campi Flegrei, o el mismo Etna. Todos ellos son una fuente abundante de ceniza volcánica para construir sólidas murallas, calzadas y edificios. El ejemplo más relevante es la cúpula del Panteón de Agripa en Roma, que a fecha de hoy sigue siendo la cúpula más grande jamás construida por el hombre con esa estructura de hormigón, y sin tener ninguna armadura de acero.

Pero, ¿cómo los volcanes pueden provocar esos efectos devastadores sobre la humanidad, o las extinciones en masa? La respuesta es porque los volcanes cambian el clima, fundamentalmente hacia un súbito enfriamiento, a veces denominado invierno volcánico que puede durar desde pocos años hasta siglos. Este cambio climático es brusco y sin posibilidad de reacción o adaptación, por lo que se provoca hambrunas, muertes en masa y sus consecuencias derivadas.

Los volcanes y el cambio climático

Cuando se produce una erupción volcánica se emite a la atmósfera magma (en forma de cenizas, bombas volcánicas o coladas de lava) pero también un volumen enorme de gases volcánicos. Estos gases fundamentalmente son agua, entre el 80% y el 95% del volumen emitido, seguidos del dióxido de carbono (CO_2) y como tercer gas en volumen (a veces hasta un 10% del total) se encuentra el dióxido de azufre (SO_2), junto con otros tipos de gases de diversa naturaleza. Aunque se ha dicho que el dióxido de azufre es el tercer gas en proporción, algunas erupciones pueden emitir millones de toneladas de este gas a la atmósfera. Una de las propiedades de este gas es que cuando se combina con el agua forma el conocido ácido sulfúrico (H_2SO_4). En una erupción volcánica estos gases son emitidos en forma de chorro o jet hasta las capas altas de la Troposfera, llegando a alcanzar en algunos casos hasta los 20 km de altura y dispersándose por la Estratosfera, en algunos casos ayudados por las corrientes de chorro. El ácido sulfúrico es una molécula que forma dobletes y que son relativamente grandes y entre sus propiedades está que la luz infrarroja se refleja en ellos dada su relación entre tamaño de la molécula y longitud de onda.

Así pues cuando tiene lugar una erupción volcánica relativamente energética (al menos como la erupción del Pinatubo de 1991) se dispersa en la Estratosfera un volumen suficientemente grande de ácido sulfúrico como para hacer que una parte significativa de la radiación infrarroja procedente del Sol se refleje hacia fuera y no penetre hacia la superficie de la Tierra. Esta radiación infrarroja es la que lleva la energía calorífica, es decir el calor, por lo que como consecuencia directa e inmediata lo que se produce es un brusco enfriamiento de la superficie terrestre. Este tipo de erupciones suficientemente energéticas ocurren en promedio cada 100 ó 150 años, y su efecto suele ser un descenso de la temperatura media de la Tierra de entre 1 ó 2 grados durante un periodo de entre 1 a 3 años. Este fue el caso del volcán Pinatubo en 1991, que produjo un descenso medio de 1 grado en todo el planeta durante 2 años. Sin embargo en algunas ocasiones se producen en un plazo corto de tiempo varias erupciones de este tipo, o incluso erupciones más grandes, que suelen ocurrir cada 200 a 500 años, lo que produce un efecto de enfriamiento mucho más brusco y duradero. En algunas de las extinciones en masa indicadas al inicio este periodo eruptivo duró algunos millones de años. La combinación de dataciones eruptivas y hechos históricos nos ha demostrado que esta coincidencia de grandes erupciones es un hecho relativamente frecuente (las estadísticas se han realizado con pocos datos, por lo que esos promedios no tienen que ser reales) y que como consecuencia sus efectos en todo el planeta han cambiado la historia^{18,19}.

Sin embargo, ¿cómo sabemos que ocurrieron esas erupciones, su volumen, la cantidad de gases emitidos y los cambios de temperatura? Para ello la comunidad científica cuenta con una serie de evidencias irrefutables²⁰⁻²² como los registros de hielos en glaciares o en los polos, los depósitos sedimentarios en lagos y mares, o los estudios de los anillos de crecimiento de los árboles entre otros. Cuando llueve o nieva el agua o nieve llevan disueltos los gases existentes en ese momento en la atmósfera, así como el polvo (o ceniza) en suspensión. A su vez, esta nieve conforme se va compactando atrapa gotas de aire de

ese mismo momento. De esta manera los hielos glaciares son testigos de la composición de toda la atmósfera, y es posible realizar estudios en detalle de cómo era el aire en cada periodo de tiempo. Por otro lado los sedimentos son granos finos de material que se van depositando en los fondos de lagos o mares. Estos granos finos son muchas veces producto de la erosión, pero también de los depósitos de caída del polvo de la atmósfera. En esa erosión también se arrastran restos biológicos, como polen u otros, de manera que de nuevo en su proceso de compactación queda un registro del momento de su formación. Finalmente toda esta información se puede combinar por ejemplo estudiando los anillos de crecimiento de los árboles o la propia dureza de las maderas, que están relacionadas con una mayor o menos bonanza climática. De esta manera la combinación de todos estos datos permite hacer reconstrucciones del clima o de las erupciones del pasado.

A modo de ejemplo curioso existen teorías, pero no son las únicas, que relacionan la calidad del sonido²³ de los instrumentos musicales construidos por Stradivarius y las erupciones volcánicas. Según una de estas teorías, estos instrumentos fueron construidos entre 1700 y 1720, por lo que los árboles usados para su construcción (arce y abeto) crecieron a finales del siglo XVII. En ese periodo hay coincidencia de varias erupciones que bajaron significativamente la temperatura en el norte de Italia, por lo que ralentizó el crecimiento de los árboles produciendo una madera más dura y con una mayor sonoridad. Aunque esta teoría es sólo un modelo, sí es cierto que los árboles y maderas de esa época se vieron afectadas por un lento crecimiento, mayor dureza, el clima era más frío y hubo diversas erupciones volcánicas grandes que afectaron al clima y hasta la fecha la sonoridad de estos instrumentos no se ha vuelto a repetir.

Algunos ejemplos de cambios sociales y los volcanes.

Cuando hablamos de erupciones volcánicas y cambios sociales no significa que una o un conjunto de erupciones determinadas sean el único efecto que dé lugar a dichos cambios, pero sí que pudieron ser los desencadenantes finales de dichos cambios sociales. Por ejemplo, no por el hecho de andar al borde de un precipicio debemos caer por él, pero si hay algo que nos da un empuje en el sentido correcto podemos terminar cayendo. De igual manera puede ocurrir en la historia. Puede que en algún lugar determinado un conjunto de circunstancias puedan estar incubando cambios sociales, y las consecuencias de una erupción volcánica aceleren o propicien los cambios definitivos. A continuación se van a revisar algunas erupciones que conllevaron cambios sociales en un plazo muy corto después de las mismas y que pudieron ser aceleradas y propiciadas por las mismas.

La erupción de Santorini (erupción Minoica), alrededor del 1630 a.C.

Esta erupción²⁴⁻²⁷ es probablemente la primera erupción del mundo occidental con algunos datos históricos asociados a ella y que influyó de manera decisiva en el concepto del fenómeno volcánico en la cultura mediterránea. Esta erupción está datada usando diferentes metodologías, y la sitúan entre el 1639 y el 1616 a.C. y por el material emitido y los efectos generados tuvieron que tener consecuencias globales en el clima y en la civilización del momento. Hay evidencias de que algunos árboles de California, de Irlanda y Suecia tienen anillos de crecimiento más estrechos coincidiendo con este proceso erup-

tivo, lo que supone un enfriamiento del clima de efectos globales. No hay datos escritos históricos de estas regiones por lo que no es posible relacionar este enfriamiento con potenciales cambios sociales. Como consecuencia de esta erupción la isla de Thera quedó destruida/desaparecida en más de un 60%. La erupción tuvo que emitir material a más de 35 km de la atmósfera y posiblemente ha sido la cuarta o quinta erupción más grande de los últimos 3000 años. Generó un tsunami que a una distancia de más de 100 km tuvo olas de más de 120 m de altura, lo que destruyó todo a su paso. Hay evidencias arqueológicas de daños hasta en las costas de Italia. Hay depósitos de cenizas de más de 1 m a más de 40 km de distancia y evidencias de que sus cenizas cayeron en la Península Ibérica.

Desde el punto de vista de relevancia histórica, en China hay datos que evidencian una destrucción de las cosechas por un frío súbito lo que conllevó hambrunas. Según algunos relatos de la época, coincidiendo con este invierno volcánico, en China²⁸ se produjo la caída de la dinastía Xia y el auge de la dinastía Shang, es decir una posible revolución interna como consecuencia final del hambre. Su mayor relevancia histórica está la muy probable desaparición de la civilización Minoica. Esta civilización asentada en la isla de Creta desaparece como prevalente coincidiendo con este periodo. Aunque se usan diferentes teorías, hay evidencias de que olas de hasta más de 150 m destruyeron ciudades, palacios y una muy alta mortandad. Hay que destacar que los restos arqueológicos de la isla de Santorini no muestran un elevado número de muertos, por lo que es probable que la isla fuese evacuada antes de la erupción, aunque también es probable que pocos sobrevivieran al tsunami posterior que devastó a todas las islas circundantes. Por otro lado los escritos egipcios revelan que coincidiendo con esta erupción se produjo un periodo de clima frío, con tormentas y lluvias torrenciales, lo que conllevó a la pérdida de cosechas, plagas y alta mortandad, sobre todo infantil. Esta mortandad se ha constatado observando un aumento de restos humanos datados en esa época y que presentaban evidentes signos de enfermedades como la difteria. Algunos relatos bíblicos, como las plagas y la apertura de las aguas del mar rojo se pueden asociar a esta erupción. La apertura o retirada de las aguas es un fenómeno típico previo a la llegada de las olas del tsunami. Recientemente se han encontrado evidencias en algunos glaciares de Groenlandia de que de manera simultánea a esta erupción (5 años más o menos de diferencia) hubo otra erupción de energía significativa en el volcán Aniakchak, al sur de Alaska. Es probable que la combinación de ambas erupciones propiciaran los efectos climáticos globales más severos, pero resulta evidente que los efectos regionales en Grecia y Egipto tuvieron una relación directa con Santorini.

La erupción del volcán Vesubio, 79 d.C.

Esta erupción²⁹⁻³³ es probablemente la más famosa de todas las históricas: es la primera erupción descrita desde el punto de vista científico y su estilo eruptivo se usa como referencia para dimensionar erupciones grandes y energéticas. Es conocida como erupción pliniana en honor a Plinio el viejo y a Plinio el joven que fueron quienes narraron de manera clara y en primera persona, porque la presenciaron, el proceso eruptivo. En ella murió Plinio el Viejo y la narración la terminó su sobrino Plinio el Joven. Contrariamente a la creencia popular, las ciudades de Pompeya y Herculano no fueron destruidas por la

lava, no hubo coladas de lava significativas, sino por flujos piroclásticos o nubes ardientes de cenizas, a muy alta temperatura (más de 500 grados) y a muy alta velocidad. Una de las referencias más populares de esta erupción son los restos de los cuerpos de los muertos encontrados en Pompeya durante las excavaciones arqueológicas (Figura 4).



Figura 4. Restos de algunos cuerpos encontrados en la ciudad de Pompeya.

Entre los diversos hitos asociados a esta erupción es de destacar que la ciudad de Pompeya fue evacuada en su mayoría antes de la erupción desplazando la población hacia la península de Sorrento. Por otro lado, en la ciudad de Herculano hubo un intento ordenado de evacuación por vía marítima, dirigida por Plinio el viejo, que fracasó en un primer intento ante la caída de bombas volcánicas, aunque hubo un destacamento militar que intentó organizar a la población para ser evacuada. Desgraciadamente un flujo piroclástico produjo una alta mortandad en la población que esperaba en las dársenas del puerto de Herculano a ser evacuadas, mientras Plinio el viejo murió de asfixia, posiblemente afectado por una nube de CO_2 . Esta evacuación ordenada hizo que de una población de aproximadamente unos 50.000 habitantes, a fecha de hoy se hayan encontrado menos de 2.000 cadáveres y se estima que en función de las zonas aún por excavar el número total de víctimas no supere los 5.000, es decir alrededor del 10% de la población. Esta proporción es preocupante en la actualidad, puesto que ahora en el entorno del Vesubio viven más de 2 millones de personas, de manera que si se volviera a repetir esta erupción y suponiendo una evacuación tan organizada como se hizo en la época romana deberíamos esperar alrededor de 200.000 muertos.

Esta erupción, fechada el 24 de agosto de 79 d.C., aunque otros historiadores la desplazan al 24 de octubre del mismo mes, tuvo una primera fase en donde se produjeron al menos dos grandes explosiones lanzando a la atmósfera dos columnas eruptivas que tuvieron que alcanzar más de 20 km de altura, seguidas de lo que se conoce como oleadas piroclásticas o nubes ardientes, que no son más que el colapso de estas columnas y un flujo de cenizas y gases a alta temperatura a ras de suelo, destruyendo todo lo que se encontraba a su paso debido a la combinación de las cenizas, la alta temperatura, los gases tóxicos y la alta velocidad. Este flujo piroclástico es el fenómeno (o peligro) volcánico más destructivo de algunas erupciones en las inmediaciones de los volcanes, pudiendo afectar a más de 20 km de distancia del volcán. Estas oleadas piroclásticas fueron las que destruyeron y cubrieron las ciudades de Pompeya, Herculano y Estabia, entre otras. En una segunda fase posterior la erupción continuó durante meses con menor energía y generando pequeñas explosiones y flujos de lava limitados. Esta erupción dio paso a una intensa y continuada actividad volcánica del Vesubio hasta que en la última erupción ocurrida el 17 de marzo de 1944 el Vesubio cesó su actividad de manera total. Es interesante indicar que esta última erupción tuvo algunas características similares a la del año 79, pero debido a que en esos momentos se estaba procediendo a la reconquista aliada de la ciudad durante la 2ª guerra mundial pasó desapercibida, aunque produjo muy severos daños a la población, e incluso a una escuadrilla de aviones estacionados en las cercanías. Actualmente se considera el Vesubio un volcán durmiente.

Aunque esta erupción del año 79 tuvo que tener influencias globales, la carencia de datos históricos de otras regiones, y la importancia en si misma de la narrativa de la erupción, ha limitado los datos adicionales. Sin embargo las consecuencias directas, y luego las indirectas, como procedimientos arqueológicos derivados de los estudios (por ejemplo el proceso de la obtención de los moldes de cadáveres mediante el relleno con yeso) han influido a la volcanología mundial. En cualquier caso el Vesubio forma parte de un gran sistema volcánico mucho más energético en el que se incluye la caldera de Campi Flegrei a unos 20 km al norte. Esta caldera ha sido responsable de lo que se conoce como mega-erupciones que han afectado de manera significativa a todo el sistema Tierra y que tarde o temprano volverá a entrar en erupción.

La pequeña Edad de Hielo de la Antigüedad Tardía, siglos V y VII.

Climáticamente el periodo desde aproximadamente el 9.000 a.C. hasta el siglo V se conoce como el periodo Holoceno Óptimo³⁴. La razón de este nombre proviene de una rápida subida de las temperaturas medias del planeta, desde el fin de la última glaciación a valores incluso superiores a los actuales, en donde en Europa no había casi glaciares ni en los Alpes, con abundante lluvia y bonanza climática en general. Esto favoreció el rápido desarrollo de las civilizaciones que conocemos. En esa época se cultivaba trigo en la actual Suiza, los vinos escoceses eran muy cotizados y el mayor granero del mundo era Egipto. Pensemos en la vestimenta de los romanos, no vestían así porque no sabían lo que eran los abrigos, sino porque no los necesitaban tanto. Sin embargo de manera brusca en los siglos V y VII la temperatura del planeta cayó de manera drástica³⁵⁻³⁷, con medias en algunos momentos de hasta 3 grados por debajo de la media actual. Nuevamente, a

finales del siglo VII las temperaturas vuelven a repuntar dando lugar a lo que se conoce climáticamente como el Periodo Medieval Cálido³⁸, que finaliza de nuevo bruscamente a partir del siglo XII, dando lugar a lo que se conoció como la Pequeña Edad de Hielo³⁹⁻⁴², cuyo fin es mediados del siglo XIX.

Existen varias teorías que intentan explicar este cambio de clima, entre ellas cambio de la actividad solar, de las corrientes marinas y por supuesto la ocurrencia simultánea de muchas y grandes erupciones volcánicas. Es posible que la mejor explicación sea la combinación de todas ellas, pero de nuevo tenemos la constatación de grandes erupciones volcánicas.

La primera de estas erupciones es la gran erupción de la caldera de Ilopango en El Salvador⁴³⁻⁴⁶, datada en el año 450 (o recientemente en el año 431), y considerada una de las más grandes de los últimos 10.000 años. Las cenizas de esta erupción cubrieron casi toda América Central y las temperaturas medias del Planeta cayeron hasta 1 grado de media de manera casi inmediata. Esta caldera tuvo una segunda erupción en el año 535 ó 539 aún mucho más energética y que llevó a un descenso de las temperaturas medias del planeta de hasta 2.3 grados de media.

Sin embargo, los estudios de los núcleos de hielo en Groenlandia han demostrado la existencia de otros depósitos de cenizas y de azufre que no coincidían con esta erupción y que además se databan para el año 539. Las características geoquímicas indican una segunda erupción casi simultánea y de similar energía y explosividad situada posiblemente el algún volcán del norte de Alaska.

Finalmente existen indicios de una tercera gran erupción, también datada en el año 536 que se sitúa en la caldera del volcán Rabaul⁴⁷ en Papúa Nueva Guinea. Esta caldera volcánica llevaba erupcionando desde aproximadamente el año 1.400 a.C. hasta poco después de esta gran erupción del año 536. La energía y explosividad de esta erupción es similar a la descrita para la caldera del Ilopango.

En todos los casos los relatos de los pueblos de la época indican que hubo un oscurecimiento casi global de la atmósfera, en algunos lugares hablaban de una especie de niebla negra seca, en otros de fríos y pérdidas de cosechas, en otros hambrunas. Las afecciones climáticas no fueron homogéneas en toda la Tierra y cada una de ella pudo influir en diferentes cambios políticos y sociales que experimentó el mundo coincidiendo con esas fechas.

El abandono de Teotihuacán⁴⁸. Se sabe que a mediados del siglo VI, y posiblemente coincidiendo con la explosión del Ilopango, una sequía intensa y el fracaso de los cultivos llevó el hambre a esta región del centro de México. Muchos arqueólogos y climatólogos sugieren que el abandono de esta ciudad-estado con la consiguiente migración de la población fue consecuencia de esta erupción.

En el sentido contrario, este cambio climático afectó a toda la península arábiga transformando las tierras desérticas en fértiles regiones con el consiguiente desarrollo demográfico⁴⁹. Este aumento de población y de alimentos contribuyó a la expansión árabe más allá de la península arábiga iniciando el proceso de las conquistas islámicas. Este período lluvioso y frío también condujo a un aumento de la tensión en el Imperio romano de Oriente y el Imperio persa sasánida, facilitando así la conquista musulmana de Siria y Palestina, la conquista musulmana de Egipto y la conquista musulmana de Persia. Junto a esta expansión muchos historiadores encuentran otras coincidencias temporales como el declive del pueblo Avarno (un pueblo situado en las orillas norte del Mar Negro), las migraciones de las tribus mongolas hacia el Oeste o el declive del imperio Gupta en la India.

Coincidiendo con este periodo aparece lo que se conoce como la Plaga de Justiniano. La plaga de Justiniano fue una pandemia que afectó al Imperio bizantino, incluyendo a la ciudad de Constantinopla (la actual Estambul) y otras partes de Europa, Asia y África entre los años 541 y 549. Se calcula que, entre estos años, la población mundial perdió entre 25 y 50 millones de personas, y se sabe que esta plaga fue causada por la peste bubónica. La peste bubónica es una enfermedad propagada por una bacteria presente en las ratas, sobre todo las ratas negras y sus parásitos. Es evidente que las erupciones volcánicas no pudieron causar el inicio de esta plaga, pero hay estudios que relacionan el clima frío y especialmente húmedo de esta región de Mediterráneo, las hambrunas asociadas y por tanto la debilidad de la población, y además un descenso general de la higiene de las ciudades para facilitar el desarrollo de esta plaga. Vemos aquí un ejemplo de cómo las consecuencias de una erupción volcánica pueden propiciar o acelerar un cambio o afección social.

Este periodo especialmente frío se inicia en el siglo V, y es en este siglo cuando se inicia también las denominadas invasiones bárbaras al imperio romano. Los historiadores sitúan la invasión de los Suevos, Alanos y Vándalos en el invierno del año 406 que al ser especialmente frío hizo que el río Rin estuviera helado permitiendo la entrada masiva de estos pueblos. Estas invasiones continuaron con las presiones de los Hunos a mediados del siglo V y posteriormente los Anglos, los Sajones, los Ostrogodos, etc. Independientemente de razones internas del propio Imperio romano, declive moral, político, económico y otros factores, muchos climatólogos asocian este incremento de la presión debido a este periodo frío especialmente en el norte y Este de Europa, lo que genera presión debido al hambre y tendencias migratorias hacia mejores climas. De nuevo los volcanes no son la causa, pero si un posible acelerante de las acciones de la Humanidad.

Las revoluciones de inicio del siglo XVII.

Como se ha comentado, a partir del siglo XIII se inicia un nuevo periodo frío en todo el mundo conocido como la Pequeña Edad de Hielo. En este periodo crecen los glaciares, hay hambrunas, plagas y cambios sociales continuados. Mención especial tiene una erupción muy energética ocurrida en un volcán emplazado en los Andes peruanos que afectó significativamente a la población mundial durante al menos 4 años y propició cambios sociales en lugares tan distantes como Rusia o China. Este volcán se denomina Huaynaputina y entró en erupción el 16 de febrero del año 1600 y se prolongó hasta el 5 de marzo

de ese año⁵⁰⁻⁵⁴. Existen numerosas narraciones de esta erupción recopiladas por religiosos, congregaciones religiosas y supervivientes de la región narrando la violencia de esta erupción. Este volcán compuesto por tres cráteres tiene una elevación de 4500 m sobre el nivel del mar. Esta erupción dejó depósitos de cenizas que cubrieron una extensión similar a la de España en el sur y oeste de Perú, en Bolivia y norte de Chile, destruyendo cosechas y trayendo el hambre a la población local. Se emitieron millones de toneladas de SO₂ a la atmósfera. Esta erupción es posiblemente la más grande de los últimos 2000 años y comparable con las del siglo VI. Estas evidencias se han registrado en núcleos de hielo de Groenlandia o la Antártida y en muchas evidencias del crecimiento de los anillos de los árboles a lo largo del mundo. Prácticamente en ese mismo periodo de tiempo, el volcán Asama en Japón y el volcán Suwanose-Jima al sur también de Japón entraron en erupción, aunque con menos energía.

Como consecuencia de estas erupciones el año 1601 fue el más frío de los últimos 600 años, a pesar de estar ya en un periodo especialmente frío. Existen crónicas de Europa (desde Islandia hasta Austria), China o Rusia de frío, enrojecimiento de la atmósfera, una neblina alta persistente y hambrunas. En China y la península de Corea los relatos históricos hablan de una llegada abrupta de frío, con plagas, epidemias y muy alta mortandad; algunos historiadores estiman en 1,5 millones de personas muertas. Las crónicas hablan de nevadas en el verano de 1601, cambios bruscos de olas de calor y frío en el otoño o incluso helarse el río Yangtsé y el mar a su desembocadura en verano imposibilitando además la pesca. Se calculan millones de muertes en esta región. En Rusia entre los años 1601 y 1603 murieron más de 2 millones de personas por hambre. En Japón, Filipinas y en algunas regiones de África también se narran situaciones de plagas y hambrunas similares.

Resulta interesante ver un cambio de dinastía que aparece de manera coetánea a estas erupciones en Rusia, la caída del zar Boris Godunov como consecuencia de las revueltas ocasionadas por el hambre y el fortalecimiento de la familia Romanov, que años después dio lugar a su reinado. En China estos acontecimientos de inicios del siglo XVII propiciaron un inicio de la debacle de la dinastía Ming dando paso años después a la dinastía Qing o Manchú, por la región de origen de esta familia. De nuevo no se puede hablar de que la erupción volcánica sea la causa, pero sus consecuencias pudieron desencadenar o acelerar los acontecimientos.

La erupción del volcán Laki (1783) y la Revolución Francesa.

El 8 de junio de 1783 surgió una fisura en el volcán Grímsvötn en Islandia, conocida como Laki⁵⁵⁻⁵⁸, que permaneció activa durante 8 meses, hasta 1784. Esta erupción no fue explosiva al modo de todas las hasta ahora narradas, pero la interacción con el agua de los glaciares y el gran volumen de SO₂ emitido sobre todo debido a su larga duración y la longitud de la fisura abierta por la que emanaban continuadas fuentes de lava, afectó de manera significativa al clima de la Tierra. En total se abrieron más de 130 cráteres a lo largo de unos pocos kilómetros. En Islandia murieron por asfixia más de 9.000 personas y más del 50% del ganado, lo que además llevó a una hambruna en la isla, de manera que al final de 1784 había muerto más de la mitad de la población de Islandia y casi la totalidad del ganado. Pero la consecuencia se extendió a todo el mundo durante tres años,

de manera que el cambio del clima destruyó cosechas, trajo epidemias y se calculan al menos 6 millones de personas muertas por el hambre en Europa. El verano del año 1783 se conoció en muchas regiones de Europa como el “verano de la arena” por la continuada caída de ceniza. Los cambios del clima fueron extremos y contrapuestos. Así en Centro y Norte de Europa la temperatura media cayó hasta 3.5 grados, con aumento de precipitaciones, mientras que el Mediterráneo y norte de África la temperatura aumentó y hubo una intensa sequía afectando incluso de manera drástica al caudal del río Nilo. Se puede mencionar como efectos climáticos adversos a lo largo de 1783 los intensos vendavales que azotaron el mar Adriático hundiendo numerosos barcos, o las gravísimas inundaciones en las regiones francesas de Auvèrnia y Limousin así como en buena parte de Alemania, especialmente en la región del Bajo Rin, consecuencia de intensísimas precipitaciones y del deshielo de la nieve acumulada en las cumbres de las montañas. Desde un punto de vista medioambiental se habla de catástrofe global. Una de las curiosidades de esta erupción fueron los cambios de tonalidad del sol a lo largo de los días, lo que daba lugar a supersticiones y ritos religiosos. Durante los mediodías se menciona que el sol se ve como lechoso, pero que a veces da calor inmenso, mientras que conforme avanzaba los atardeceres el cielo se tronaba de un rojo intenso acrecentando el miedo de la población y las creencias supersticiosas. Aunque todos estos fenómenos ya se recogían en muchos periódicos de Europa y Norte América, científicamente nadie relacionaba estos cambios climáticos bruscos, y efectos ópticos, con la erupción de Islandia, hasta que en diciembre de 1784 Benjamín Franklin en una conferencia en Manchester indicó: “esa niebla seca que cubría los cielos de Europa la había generado el volcán islandés y esa era la causa que impedía que parte de la radiación solar incidiera en la superficie terrestre”. De esta manera Benjamín Franklin se convirtió en el primer científico que relacionó las erupciones volcánicas y el cambio climático.

Una de las consecuencias directas es lo que se conoció como la “gran hambruna egipcia”. Este contraste tan rápido y abrupto de temperaturas redujo drásticamente la ocurrencia de los huracanes y los monzones, esenciales para proporcionar agua en las zonas tropicales y aumentar el curso de los ríos. Entre los más afectados fue, como se ha comentado, el río Nilo, lo que hizo que no se produjeran sus famosas crecidas que negaban e irrigaban las tierras de labor haciendo que se perdieran las cosechas durante dos años seguidos. La pérdida de dos cosechas seguidas acabó con las existencias almacenadas y derivó en una terrible hambruna que diezmó a la población egipcia, al menos se perdió a la quinta parte de su población. En la India y Japón, que a su vez fueron azotadas por el fenómeno meteorológico de El Niño, vieron morir a cerca de once millones y un millón de personas, respectivamente, a causa del hambre.

Todos hemos estudiado la revolución francesa que se declaró con la proclamación de los Estados Generales en 1789. Las causas de esta revolución fueron múltiples⁵⁹, empezando por las ideas filosóficas de los enciclopedistas que a mediados del siglo XVIII minaron las bases “del derecho divino de los reyes”, continuando con la creciente desigualdad económica y social de Francia en esa época, el crecimiento de París (la gran urbe) como centro cultural, de debate y político frente a un Versalles (rey Luis XVI) decadente,

o un problema grave de precios y abastecimiento de la población urbana frente al control de la nobleza de la producción agrícola y ganadera rural. Pero a todos estos factores se le debe añadir las consecuencias de la erupción del volcán Laki. Francia fue especialmente afectada por el frío de Centro Europa, con grandes nevadas en invierno, inundaciones y deshielos súbitos y la consecuente hambruna, subida de precios de los alimentos, y en el caso francés un control de los canales de abastecimiento de la nobleza especulando con los alimentos. Además se añade la trivialización y mala gestión política del rey Luis XVI de la situación, cada vez más alejado de la población. En algunas crónicas se atribuye una frase a la reina María Antonieta en donde aseguran que dijo “esta nieve es ideal para salir en trineo”, que fue usada para exacerbar a las masas hambrientas. Este panorama no hizo más que acelerar, o encender la chispa que desencadenó pocos años después en dicha revolución. Puede que la revolución terminara realizándose, no cabe duda, pero quizá el momento, la violencia y la rapidez con la que ocurrió sí que estuvieron asociados al proceso eruptivo.

La erupción del Monte Tambora en 1815

En abril de 1815, el Monte Tambora, un volcán situado en la isla de Sumbawa, en las entonces Indias Orientales Neerlandesas, hoy Indonesia, entró en actividad. La explosión produjo enormes nubes de ceniza y polvo que se elevaron a la estratósfera. Se considera que durante las primeras horas del evento más de 12,000 personas murieron debido a las nubes de ceniza ardiente que descendieron del volcán y a la poderosa lluvia de ceniza que literalmente los asfixió⁶⁰. Más de 71,000 personas murieron después de la erupción^{61,62}, principalmente a causa del hambre, pues quedaron devastadas todas las cosechas; otros por enfermedades respiratorias; gastrointestinales y también por sed, debido a la contaminación de los acuíferos. La actividad del Tambora de 1815 es una de las más poderosas en la historia reciente, fue seguida por un descenso en las temperaturas, lluvias atípicas, entre otros, lo que trajo consigo la pérdida de cosechas que provocó grandes hambrunas en diferentes partes del planeta. Derivado de este evento, el año de 1816 fue conocido en el continente europeo como el “Año sin verano”. En sitios como Francia retrasaron las vendimias del sur hasta los últimos días de octubre, mientras que las de la cuenca del río Rhin lo hicieron hasta principios de noviembre. En Centroeuropa, fuertes tormentas generalizadas descargaron granizo de tamaño considerable y las riadas arrastraron personas, animales y enseres⁶³. Incluso hubo necesidad de sacrificar al ganado que no se podía mantener y aumentó la emigración hacia Estados Unidos. Irlanda fue más lluvioso de lo normal en ese año, y no se logró el cultivo de la patata, que era prácticamente el único existente; seguidamente fue atacada por una epidemia de tifus entre 1816 y 1819, lo que provocó que miles de personas perecieran y que varios miles más cruzaran el Océano rumbo a América, para escapar del frío y de la hambruna. En España las cosechas fueron también malas y los viñedos se afectaron por las bajas temperaturas, la ausencia de sol y las abundantes lluvias retrasaron las cosechas hasta noviembre de 1816. En Reino Unido la ausencia de alimentos ocasionada por el año sin verano originó olas de protesta social violentas. La escasez de trigo, el centeno y otros cereales a través de las islas británicas condujeron a la falta de pan. Estallaron disturbios en los condados de Anglia, Inglaterra, en mayo de 1816; en marzo de 1817 más de 10,000 personas se manifestaron

en Manchester; mientras que en junio comenzó el llamado “Levantamiento de Pentrich”, para invadir y ocupar la ciudad de Nottingham. Se dieron revueltas similares en Escocia y Gales^{61,62}.

En el área que hoy comprende la actual República Checa (entonces perteneciente al imperio austriaco) se registró en 1815 un verano muy húmedo y para 1816 uno muy frío, que contribuyó a las malas cosechas, la falta de pan y, por ende, el hambre y el aumento generalizado de los precios⁶⁴. El invierno de 1815-1816 fue particularmente frío en Norteamérica; sin embargo, cuando llegó el mes de mayo y aquello continuaba, la gente se empezó a preocupar. En la primavera y el verano de 1816 los observadores informaron de una persistente niebla seca, que ni el viento ni la lluvia lograban dispersar. En Nueva Inglaterra el año comenzó con un invierno moderado pero seco⁶⁵. La primavera tardó y continuó muy seca. No obstante, la temporada de crecimiento que va desde finales de la primavera y hasta principios del otoño fue marcada por una serie de devastadoras olas de frío que causaron grandes daños a los cultivos y redujeron considerablemente el suministro de alimentos. En las zonas del centro y norte de Nueva Inglaterra, el verano tuvo sólo dos períodos prolongados con heladas o cerca de temperaturas de congelación. Una nieve generalizada cayó en junio y, como resultado, el maíz no maduró y el heno, las frutas y las verduras se redujeron considerablemente en cantidad y calidad. Asimismo, la helada mató a la mayoría de los cultivos en las partes más altas de Nueva York, cayendo nevadas en el mes de junio, mientras que en agosto se presentaron nevadas en sitios más al sur como Virginia, lo provocó una gran escasez que trajo consigo el incremento alarmante en el precio de los cereales.

Las consecuencias climáticas de la erupción del Tambora de 1815, muestran que en China también sucedió una reducción sustancial en la temperatura al año siguiente (1816) en el norte y centro del país, y acumulaciones anormales de nieve y hielo en el sur. Asimismo, se suscitó una sequía notable en el este. Los cultivos de arroz, trigo y cebada de la provincia de Yunnan, en el sudoeste, resultaron gravemente afectados de 1815 a 1817, ocasionando severas hambrunas en la población⁶⁶. Además de la actividad del Tambora de 1815, sabemos que en los años precedentes hubo otros eventos volcánicos de menor magnitud como una erupción de la que poco se sabe entre los años 1808-1809⁶⁷; otra en el volcán La Soufrière, en la isla Guadalupe, en 1812; y la del volcán Mayón, en la isla Luzón en Filipinas en 1814, todo lo cual pudo haber potenciado cambios en el clima y provocar el descenso en las temperaturas. Se considera que el estallido del Tambora en 1815 es de los sucesos más violentos en la historia, y se calcula que la explosión elevó un número superior a 150 kilómetros cúbicos de material⁶⁵ lo que equivale a una montaña de 1 km de ancho x 1 km de largo x 150 km de alto de rocas pulverizadas, cenizas y aerosoles de sulfatos eyectados a la atmósfera. Como se puede apreciar, las zonas de afectación por cambios en el clima fueron importantes en Norteamérica, Asia y Europa; sin embargo, los registros estudiados en los hielos de la Antártida y el Polo Norte dan cuenta de que la afectación fue global.

Esta erupción trajo consigo algunos hechos sociales y culturales que no sospecharíamos que fueron disparados o relacionados con el fenómeno volcánico. Uno de ellos fue la llamada conquista del Oeste. Como consecuencia de las hambrunas en Europa, millones de personas emigraron a Norte América, es especial a la zona de Nueva York y Nueva Inglaterra. Pero allí la situación era similar a la que acontecía en Europa de manera que estos emigrantes, junto a familias ya asentadas en la zona decidieron dejar Nueva Inglaterra y Nueva York, y se trasladaron al medio oeste en busca de un clima más hospitalario, suelo más rico y mejores condiciones de crecimiento. También es cierto que esta emigración se habría dado sin las anomalías de 1816, pero es altamente probable que las malas condiciones meteorológicas y la hambruna existente, estimularon a las familias de los estados del este para buscar mejores escenarios de vida en el oeste, esperando que las circunstancias en otros sitios fuesen más favorables.

Una de las consecuencias de esta emigración es que actualmente en el medio oeste de EEUU existen poblaciones en donde aún se conserva el idioma de procedencia de las primeras familias; se habla noruego, checo, alemán, etc. Otra de las consecuencias de esta oleada migratoria y otra, unos años después, es la razón de la tradición de que la policía de EEUU celebra a San Patricio (patrón de Irlanda), toca gaitas y los trajes de gala usan el kilt escocés. Estos emigrantes irlandeses y escoceses eran jóvenes muy fornidos, pero de origen agrícola y con nula formación cultural o tecnológica. Los pocos empleos que podían encontrar eran los de estibadores de puerto o ayudantes de policías. En aquella época el ayudante de policía era un empleo de muy bajo sueldo y sólo se requería fuerza bruta, por lo que pasados unos años la gran mayoría de estos ayudantes fueron irlandeses y escoceses que incorporaron sus tradiciones a la de la policía americana.

Culturalmente este periodo frío trajo algunas obras de terror clásicas, fundamentalmente “Frankenstein o el Moderno Prometeo” (Mary Shelley), Darkness (Lord Byron), y El vampiro (John Polidori). La razón es la visita que realizaron a Lord Byron, convaleciente en el lago Ginebra en Suiza, en 1783 y años posteriores, varios amigos suyos como el poeta y filósofo romántico Percy Bysshe Shelley, su esposa Mary Shelley o John Polidori. Esta visita coincidió con el “año sin verano” y Ginebra estaba azotada por intensas tormentas, frío y oscuridad. Este ambiente tan tenebroso permitió, inicialmente como un juego para pasar las veladas a través de relatos inventados de terror, escribir estas novelas. Junto a estos relatos literarios podemos indicar que en este periodo se compuso el villancico “Noche de Paz”. En 1816 las bajas temperaturas inutilizaron el órgano de la iglesia de san Nicolás en Oberndorf, Austria. Cuando llegó la Navidad, nadie había querido ir a las montañas del Este de Salzburgo para reparar el instrumento, de modo que el párroco, Josef Mohr, escribió un villancico y recurrió a su amigo Franz Xaver Gruber para que le pusiera música, capaz de ser cantada sin acompañamiento por un coro. Así nació Stille Nacht! Heilige Nacht! (‘¡Noche tranquila!, ¡noche sagrada!’), que nosotros conocemos como “Noche de Paz”. Finalmente, la falta de avena para alimentar a los caballos inspiró al inventor alemán Karl Christian Ludwig Drais von Sauerbronn (Karl Drais) inventando la Draisiana que sería el precursor del velocípedo y luego la bicicleta.

La erupción del volcán Krakatoa

El 27 de agosto de 1883 cuatro enormes explosiones ocurrieron en la isla de Rakata (Krakatoa) en el estrecho de Sonda entre Java y Sumatra, hoy Indonesia. Una gran región del estrecho de Sonda y varios lugares en la costa de Sumatra fueron afectados por flujos calientes de rocas y cenizas, que evaporaron el agua cercana a la isla. Las explosiones fueron tan violentas que se oyeron incluso en Perth, Australia, y en la isla de Rodrigues en el Océano Índico, cerca de las Islas Mauricio, a 4,800 kilómetros de distancia⁶⁸. Las crónicas narran que el estruendo de la destrucción de Krakatoa fue escuchado a varios miles de kilómetros, alcanzando niveles cercanos a los 180 decibelios a una distancia de 160 km del volcán⁶⁹ y la ceniza fue propulsada a una altura comprendida entre los 25 y 36 kilómetros y esparcida por todo el planeta. Asimismo, se generó un tsunami entre 30-40 metros de altura⁷⁰ (Figura 5). No hubo ningún superviviente entre los 3,000 habitantes de la Isla de Sebesi, a unos 13 kilómetros de Krakatoa⁷¹. Los flujos piroclásticos que viajaron sobre la superficie del agua —a 300 kilómetros por hora— mataron alrededor de 1,000 personas en Ketimbang, en la costa Sumatra, a unos 40 km al norte de Krakatoa⁷². El recuento oficial de víctimas mortales registrado por las autoridades holandesas fue de 36,417, 90% de los cuales fue debido a los tsunamis⁶⁸. La nube de polvo que elevó la erupción a la estratósfera contenía grandes volúmenes de dióxido de azufre⁷³. Estas moléculas de gas se combinaron rápidamente con vapor de agua generando gotas de ácido sulfúrico en la alta atmósfera. El velo resultante de aerosoles ácidos y polvo volcánico proporcionó un escudo atmosférico capaz de reflejar suficiente luz solar para hacer que las temperaturas globales bajaran varios grados. Este velo rico en aerosoles también generó espectaculares efectos ópticos sobre 70% de la superficie terrestre.

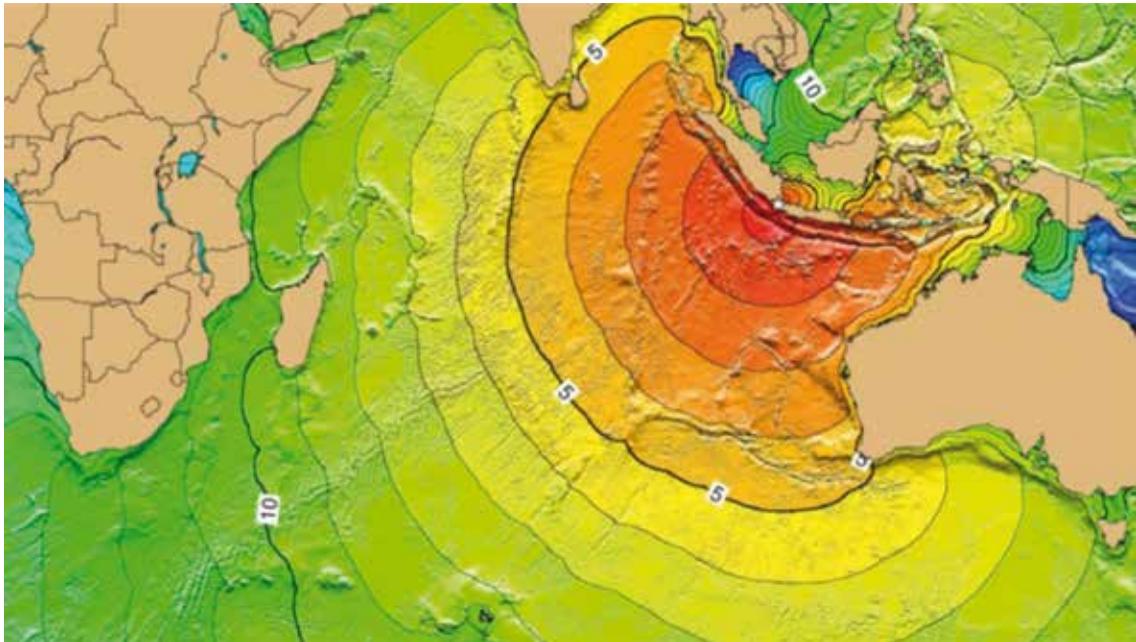


Figura 5. Mapa de la evolución del Tsunami originado en la erupción del volcán Krakatoa. Los colores rojizos son las zonas de mayor altura de las olas y los verdes los de menor, pero se puede observar cómo afectó fuertemente hasta las costas de África.

Se estima que la erupción de 1883 de Krakatoa expulsó solamente 20 kilómetros cúbicos de material al aire (veinte mil millones de metros cúbicos) nada comparado a los más de 150 kilómetros cúbicos de material⁶⁵ que arrojó a la estratósfera la erupción del Monte Tambora de 1815. Sin embargo, sus efectos no son nada despreciables si los comparamos con los eventos eruptivos más importantes del siglo XX, en los que apenas se tuvieron emisiones cercanas al kilómetro cúbico de material.

Durante varios años después del evento de 1883, la Tierra experimentó colores exóticos en el cielo, halos alrededor del Sol y la Luna, y una espectacular variedad de anómalas puestas de sol y amaneceres que sirvieron de inspiración a varios pintores en distintos sitios del planeta, quienes plasmaron en sus obras los extravagantes colores que se observaban en el cielo. Algunos críticos de arte consideran que la célebre obra “El grito” compuesta por cuatro cuadros del noruego pintor Edvard Munch, finalizada en 1893, tuvo como fuente de inspiración la atormentada vida del artista, pero dada la fecha del inicio de la serie de cuadros y los colores rojizos del fondo, otros críticos consideran que la obra está inspirada en estos atardeceres volcánicos (Figura 6). De igual manera estos cielos inspiraron al artista William Ascroft con más de 500 cuadros en donde se releja este fondo dramático (Figura 6). En Canadá, Frederic Edwin Church se instaló en Ontario para producir la mayor cantidad de obras posibles con ese fenómeno y el pintor Eduard Pechuël-Loesche, aparte de sus pinturas hizo una gran aportación a la ciencia pues ilustró



Figura 6. Izquierda. Serie de cuadros del pintor William Ascroft inspirados en los atardeces rojos después de la erupción del Krakatoa. Derecha “El grito” del pintor noruego Edvard Munch.

de manera muy precisa (no había fotografía en color en la época) los efectos ópticos observados tras la erupción del Krakatoa. Estos cielos rojos del atardecer trajeron un aumento de los suicidios de personas que consideraban que eran el fin del mundo, asociado a la cercanía del siglo XX. Todos sabemos que las fechas redondas atraen las supersticiones, año 2000, año 100, etc.

Desde el punto de vista científico esta erupción fue la confirmación de que los volcanes afectan al clima, pero también el descubrimiento de las corrientes en chorro. La corriente en chorro (jet stream en inglés) se descubrió tras la aportación de numerosos observadores científicos del clima que rastrearon y mapearon durante varios años cuidadosamente cuando los cielos de algunas ciudades se enrojecían por las nubes de polvo volcánico que se divisaban a cierta altura. Con esos datos realizaron un mapa que mostraba cómo estas corrientes de viento se movían alrededor del mundo. El nombre que se utilizó para definir el fenómeno fue el de “Corriente Ecuatorial de humo”, y es a lo que hoy en día se conoce como corriente en chorro, que sigue siendo tal vez el legado más importante de la erupción del Krakatoa y de gran ayuda para los meteorólogos y la aviación comercial.

Casos recientes

En época reciente hemos visto cómo las erupciones volcánicas, no importa el sitio del mundo en el que se encuentren, tienen el potencial de causar perturbaciones en cualquier rincón del planeta, algunas de ellas con severas afectaciones a la economía mundial. El 15 de diciembre de 1989 a un avión Boeing 747, de la compañía KLM, que realizaba la ruta Amsterdam-Tokyo, con 244 personas a bordo, se le apagaron temporalmente los motores cuando cruzó una nube de ceniza procedente del volcán Redoubt en Alaska, por lo que perdió más de 4,000 metros de altura, causando pánico entre los pasajeros. Aunque no hubo heridos, sus cuatro motores quedaron inutilizados y tuvieron que ser reemplazados, así como varias piezas de la aeronave a un costo de 80 millones de dólares⁷⁴. Otro ejemplo reciente del que ya hemos hablado se presentó en marzo de 2010, cuando una serie de erupciones ocurrieron sobre el glaciar Eyjafjallajökull, en Islandia. La actividad del 14 de abril arrojó ceniza a la atmósfera, llegando a alcanzar una altura inicial de 9.5 km extendiéndose por un área de miles de km², lo que causó la interrupción del tráfico aéreo⁷⁵, el cierre de aeropuertos y del espacio aéreo sobre la mayor parte del norte de Europa, ocasionando la suspensión de más de cien mil vuelos y la afectación a aproximadamente diez millones de pasajeros⁷⁶. Todas las rutas de Asia-Pacífico, África, Norteamérica y Sudamérica se vieron severamente afectadas en sus trayectos desde y hacia Europa, con lo que las pérdidas económicas se tasaron en miles de millones de dólares. El suceso puso en evidencia la vulnerabilidad de los mecanismos de coordinación y emergencia por parte de las autoridades europeas, así como la dependencia económica mundial en la aviación comercial. La navegación aérea es una actividad que de manera inmediata es sensible a los procesos de origen volcánico. La ceniza contenida en las columnas eruptivas es abrasiva y tiene el potencial de causar daños irreversibles en los motores de las aeronaves. Actualmente vuelan en el mundo más de 100,000 aviones por día (www.flightradar24.com) y cada año la tendencia va en aumento. Este incremento en el número de vuelos eleva la vulnerabilidad y la exposición y, por lo tanto, aumenta el riesgo.

Conclusiones

Los estudios científicos indican que las grandes erupciones pueden ocasionar que el clima del planeta se modifique varios grados durante un periodo de tiempo, entre dos y cinco años posteriores al evento. Actividades como las Laki en 1783, Tambora en 1815 o Krakatoa en 1883 son poco comunes, pero pueden repetirse en otros volcanes de la zona y causar fenómenos como el del año sin verano de 1816. Sin embargo, estos sucesos son minúsculos comparados con las grandes erupciones de épocas geológicas (Toba, Taupo, Yellowstone, etc.) en donde fueron lanzados a la atmósfera billones de toneladas de material. Las cenizas finas producidas durante un acontecimiento volcánico explosivo pueden dispersarse en una vasta área donde representan una amenaza para el clima, la salud humana y las infraestructuras⁷⁷. La ocurrencia de una erupción con características similares a las de Tambora en 1815 o Krakatoa en 1883, el acelerado crecimiento poblacional y el incremento en las condiciones de exposición y vulnerabilidad existentes, traería consigo graves repercusiones económico-sociales en el planeta. Es importante señalar que la población mundial ha pasado de unos 1.000 millones de habitantes que había en 1800, a más de 7.867 millones en 2022. Asimismo, han prosperado ciudades importantes en áreas en las que hace 200 años no vivía persona alguna. Por tal razón deben desarrollarse estrategias conjuntas para paliar los efectos negativos que traería consigo al menos un evento volcánico de estas características. No se descarta que debido a esto pudiera producirse una crisis agroalimentaria en la que estuviese en juego el abasto de los cultivos básicos como el maíz, el trigo y el arroz, cuyos principales productores y consumidores son algunos que poseen actividad volcánica. En los últimos 40 años existen casos estudiados en los que erupciones menores han originado cambios en el medio físico y el medio ambiente, además de tener repercusiones sociales de relevancia. Los más recientes son los de Mount St. Helens en Estados Unidos (1980); el Volcán Chichón, en México (1982); El Monte Redoubt en Alaska, Estados Unidos (1989); el Monte Pinatubo, en las Filipinas (1991) los volcanes chilenos Hudson (1991) Chaitén (2008) y Calbuco (2015) Eyjafjallajökull, Islandia (2010) y más reciente el caso del volcán La Palma (2021) en las islas Canarias. Todas estas erupciones en su conjunto no han llegado a emitir siquiera el 20% de las emisiones que tuvo por sí solo el Monte Tambora en 1815. Hoy día, el uso de satélites y otras herramientas geomáticas nos permiten conocer el comportamiento de las partículas de ceniza después de un evento volcánico y hacer un seguimiento puntual de su desplazamiento, dispersión, suspensión y afectaciones alrededor del planeta. A pesar de esto, aún no es posible paliar los efectos climáticos que pueden causar estos acontecimientos, y lo único que nos queda es generar estrategias de prevención ante su posible ocurrencia⁷⁸. Consideramos que todos los países del mundo son altamente susceptibles a sufrir las consecuencias económico-sociales en caso de presentarse una erupción con las características de Laki, Tambora o Krakatoa. Creemos que se generaría una crisis social debido a un invierno volcánico que traería consigo escasez de alimentos, epidemias, conflictos sociales y pérdidas económicas severas. Los antecedentes geológicos e históricos nos indican que el planeta volverá a sufrir los efectos que trae consigo una gran actividad volcánica. La pregunta es: ¿están preparados para ello los grupos científicos, los gobiernos y la sociedad civil?

Referencias.

- 1 Wang, K., Orth, C. J., Attrep Jr, M., Chatterton, B. D., Wang, X., & Li, J. J. (1993). The great latest Ordovician extinction on the South China Plate: Chemostratigraphic studies of the Ordovician-Silurian boundary interval on the Yangtze Platform. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 104(1-4), 61-79.
- 2 Romero Pérez, P. (2017). Actividad volcánica y extinción masiva en el transcurso del Pérmico al Triásico: impacto sobre el clima y la biodiversidad.
- 3 Canudo, J. I., Pereda Suberbiola, X., & López Martínez, N. (2000). Los dinosaurios del Maastrichtiense superior de Huesca y su importancia en el estudio de la extinción del límite Cretácico/Terciario.
- 4 Little, C. T., & Benton, M. J. (1995). Early Jurassic mass extinction: a global long-term event. *Geology*, 23(6), 495-498.
- 5 Chester, D. (1993). *Volcanoes and society*. London.
- 6 Martí, J., & Ernst, G. G. (Eds.). (2008). *Volcanoes and the Environment*. Cambridge University Press.
- 7 Cashman, K. V., & Giordano, G. (2008). Volcanoes and human history. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176(3), 325-329.
- 8 Dvorak, J. (2007). Volcano myths and rituals: differing views of the universe add to the challenge of dealing with natural disasters. *American Scientist*, 95(1), 8-10.
- 9 Whyte, M. (2010). *Myth of the social volcano*. In *Myth of the Social Volcano*. Stanford University Press.
- 10 De Boer, J. Z., & Sanders, D. T. (2012). Volcanoes in human history. In *Volcanoes in Human History*. Princeton University Press.
- 11 Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., & Stix, J. (Eds.). (2015). *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier.
- 12 Barreda, A. (2018). Gastronomy tourism as a marketing strategy for place branding. In *The Routledge Handbook of Destination Marketing* (pp. 216-228). Routledge.
- 13 Erfurt-Cooper, P., Sigurdsson, H., & Lopes, R. M. (2015). Volcanoes and tourism. In *The encyclopedia of volcanoes* (pp. 1295-1311). Academic Press.
- 14 Block, J. W. (1975). Sodom and Gemorrah: A Volcanic Disaster. *Journal of Geological Education*, 23(3), 74-77.
- 15 Dunn, J. E. (2014). A God of Volcanoes: Did Yahwism Take Root in Volcanic Ashes? *Journal for the Study of the Old Testament*, 38(4), 387-424.
- 16 Chester, D. K., & Duncan, A. M. (2010). Responding to disasters within the Christian tradition, with reference to volcanic eruptions and earthquakes. *Religion*, 40(2), 85-95.
- 17 Jackson, M., & Marra, F. (2006). Roman stone masonry: volcanic foundations of the ancient city. *American Journal of Archaeology*, 110(3), 403-436.
- 18 Cole Dai, J. (2010). Volcanoes and climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(6), 824-839.
- 19 Robock, A. (2015). Climate and climate change: volcanoes: role in climate. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition* (pp. 105-111). Elsevier Inc.
- 20 Emeis, K. C., Struck, U., Schulz, H. M., Rosenberg, R., Bernasconi, S., Erlenkeuser, H., ... & Martinez-Ruiz, F. (2000). Temperature and salinity variations of Mediterranean Sea surface waters over the last 16,000 years from records of planktonic stable oxygen isotopes and alkenone unsaturation ratios. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 158(3-4), 259-280.

- 21 Rohling, E. J., & De Rijk, S. (1999). Holocene Climate Optimum and Last Glacial Maximum in the Mediterranean: the marine oxygen isotope record. *Marine Geology*, 153(1-4), 57-75.
- 22 Martínez-Ruiz, F., Kastner, M., Gallego-Torres, D., Rodrigo-Gámiz, M., Nieto-Moreno, V., & Ortega-Huertas, M. (2015). Paleoclimate and paleoceanography over the past 20,000 yr in the Mediterranean Sea Basins as indicated by sediment elemental proxies. *Quaternary Science Reviews*, 107, 25-46.
- 23 Gough, C. (2000). Science and the Stradivarius. *Physics World*, 13(4), 27.
- 24 Friedrich, W. L., Kromer, B., Friedrich, M., Heinemeier, J., Pfeiffer, T., & Talamo, S. (2006). Santorini eruption radiocarbon dated to 1627-1600 BC. *Science*, 312(5773), 548-548.
- 25 Driessen, J. (2003). Towards an archaeology of crisis: Defining the long-term impact of the Bronze Age Santorini eruption. In *Natural disasters and cultural change* (pp. 266-279). Routledge.
- 26 Pyle, D. M. (1997). The global impact of the Minoan eruption of Santorini, Greece. *Environmental Geology*, 30(1), 59-61.
- 27 Bottema, S., & Sarpaki, A. (2003). Environmental change in Crete: a 9000-year record of Holocene vegetation history and the effect of the Santorini eruption. *The Holocene*, 13(5), 733-749.
- 28 Manning, S. W., & Sewell, D. A. (2003). Volcanoes and history: a significant relationship? The case of Santorini: W. M. A. S. In *Natural disasters and cultural change* (pp. 280-307). Routledge.
- 29 Sigurdsson, H., Cashdollar, S., & Sparks, S. R. (1982). The eruption of Vesuvius in AD 79: reconstruction from historical and volcanological evidence. *American journal of archaeology*, 86(1), 39-51.
- 30 Sigurdsson, H., & Carey, S. (2002). The eruption of Vesuvius in AD 79. The natural history of Pompeii, 37-64.
- 31 Gurioli, L., Pareschi, M. T., Zanella, E., Lanza, R., Deluca, E., & Bisson, M. (2005). Interaction of pyroclastic density currents with human settlements: evidence from ancient Pompeii. *Geology*, 33(6), 441-444.
- 32 Petrone, P. (2019). The Herculaneum victims of the 79 AD Vesuvius eruption: a review. *J. Anthropol. Sci*, 97, 69-89.
- 33 Jashemski, W. M. F., & Meyer, F. G. (2002). *The natural history of Pompeii*. Cambridge University Press.
- 34 Stötter, J., Wastl, M., Caseldine, C., & Häberle, T. (1999). Holocene palaeoclimatic reconstruction in northern Iceland: approaches and results. *Quaternary Science Reviews*, 18(3), 457-474.
- 35 Büntgen, U., Myglan, V. S., Ljungqvist, F. C., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl, M., ... & Kirilyanov, A. V. (2016). Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature geoscience*, 9(3), 231-236.
- 36 Peregrine, P. N. (2020). Climate and social change at the start of the Late Antique Little Ice Age. *The Holocene*, 30(11), 1643-1648.
- 37 Helama, S., Jones, P. D., & Briffa, K. R. (2017). Limited late antique cooling. *Nature Geoscience*, 10(4), 242-243.
- 38 Crowley, T. J., & Lowery, T. S. (2000). How warm was the medieval warm period?. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(1), 51-54.
- 39 Mann, M. E. (2002). Little ice age. *Encyclopedia of global environmental change*, 1(504), e509.
- 40 Grove, J. M. (2012). *The little ice age*. Routledge.

- 41 Fagan, B. (2000). *The little ice age*. New York.
- 42 White, S. (2013). The real little ice age. *Journal of Interdisciplinary History*, 44(3), 327-352.
- 43 Newfield, T. P. (2018). The climate downturn of 536–50. *The palgrave handbook of climate history*, 447-493.
- 44 Dull, R. A., Southon, J. R., Kutterolf, S., Anchukaitis, K. J., Freundt, A., Wahl, D. B., ... & Oppenheimer, C. (2019). Radiocarbon and geologic evidence reveal Ilopango volcano as source of the colossal ‘mystery’ eruption of 539/40 CE. *Quaternary Science Reviews*, 222, 105855.
- 45 Dull, R. A., Southon, J. R., & Sheets, P. (2001). Volcanism, ecology and culture: A reassessment of the Volcán Ilopango TBJ eruption in the southern Maya realm. *Latin American Antiquity*, 12(1), 25-44.
- 46 Smith, V. C., Costa, A., Aguirre-Díaz, G., Pedrazzi, D., Scifo, A., Plunkett, G., ... & Gutiérrez, E. (2020). The magnitude and impact of the 431 CE Tierra Blanca Joven eruption of Ilopango, El Salvador. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(42), 26061-26068.
- 47 Heming, R. F. (1974). Geology and petrology of Rabaul Caldera, Papua New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*, 85(8), 1253-1264.
- 48 Nichols, D. L. (2016). Teotihuacan. *Journal of Archaeological Research*, 24(1), 1-74.
- 49 Büntgen, U., Myglan, V. S., Ljungqvist, F. C., McCormick, M., Di Cosmo, N., Sigl, M., ... & Kirilyanov, A. V. (2016). Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature geoscience*, 9(3), 231-236.
- 50 Fei, J., Zhang, D. D., & Lee, H. F. (2016). 1600 AD Huaynaputina eruption (Peru), abrupt cooling, and epidemics in China and Korea. *Advances in Meteorology*, 2016.
- 51 De Silva, S. L., & Zielinski, G. A. (1998). Global influence of the AD 1600 eruption of Huaynaputina, Peru. *Nature*, 393(6684), 455-458.
- 52 Adams, N. K., de Silva, S. L., Self, S., Salas, G., Schubring, S., Permenter, J. L., & Arbesman, K. (2001). The physical volcanology of the 1600 eruption of Huaynaputina, southern Peru. *Bulletin of Volcanology*, 62(8), 493-518.
- 53 Prival, J. M., Thouret, J. C., Japura, S., Gurioli, L., Bonadonna, C., Mariño, J., & Cueva, K. (2020). New insights into eruption source parameters of the 1600 CE Huaynaputina Plinian eruption, Peru. *Bulletin of Volcanology*, 82(1), 1-19.
- 54 Stoffel, M., Khodri, M., Corona, C., Guillet, S., Poulain, V., Bekki, S., ... & Masson-Delmotte, V. (2015). Estimates of volcanic-induced cooling in the Northern Hemisphere over the past 1,500 years. *Nature Geoscience*, 8(10), 784-788.
- 55 Thordarson, T., & Self, S. (2003). Atmospheric and environmental effects of the 1783–1784 Laki eruption: A review and reassessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D1), AAC-7.
- 56 Zambri, B., Robock, A., Mills, M. J., & Schmidt, A. (2019). Modeling the 1783–1784 Laki eruption in Iceland: 2. Climate impacts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(13), 6770-6790.
- 57 Jackson, E. L. (1982). The Laki Eruption of 1783: impacts on population and settlement in Iceland. *Geography*, 42-50.
- 58 Guilbaud, M. N., Blake, S., Thordarson, T., & Self, S. (2007). Role of syn-eruptive cooling and degassing on textures of lavas from the AD 1783–1784 Laki eruption, South Iceland. *Journal of Petrology*, 48(7), 1265-1294.
- 59 Necker, J. Causes of the French Revolution.

- 60 Fagan, B. (2008). La pequeña edad de hielo. Cómo el clima afectó a la historia de Europa. 1300-1850. Extensión Científica Ciencia para Todos. Barcelona: Gedisa.
- 61 Oppenheimer, C. (2003a). Climatic, Environmental and Human Consequences of the Largest Known Historic Eruption: Tambora Volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography*, 27 (2): 230-259, June 1.
- 62 Oppenheimer, C. (2003b). Ice Core and Palaeoclimatic Evidence for the Timing and Nature of the Great Mid-13th Century Volcanic Eruption. *International Journal of Climatology*, 23: 417-426.
- 63 Gozalo de Andrés, C. (1991). El año sin verano. La Meteorología en el mundo iberoamericano. Nº 6. Madrid: INM.
- 64 Brázdil, R.; Řezníčková, L.; Valášek, H.; Dolák, L. and Kotyza, O. (2016). Climatic Effects and Impacts of the 1815 Eruption of Mount Tambora in the Czech Lands. *Climate of the Past*, 12: 1361-1374.
- 65 Heidorn, K.C. (2004). Eighteen Hundred and Froze to Death, The Year There Was No Summer. País: Weather People and History.
- 66 Chaochao, G.; Yujuan, G.; Qian, Z. and Chunming, S. (2017). Climatic Aftermath of the 1815 Tambora Eruption in China. *Journal of Meteorological Research*, 31 (1): 28-38, February.
- 67 Dai, J.; Mosley-Thompson, E. and Thompson, L.G. (1991). Ice Core Evidence for an Explosive Tropical Volcanic Eruption 6 Years Preceding Tambora. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 96 (D9): 17361-17366, September.
- 68 Symons, G.J. (1888). The Eruption of Krakatoa and Subsequent Phenomena. London: Report of the Krakatoa Committee of the Royal Society.
- 69 Oliveira, J.M.; Vedo, S.; Campbell, M.D. and Atkinson, J.P. (2010). KSC VAB Aeroacoustic Hazard Assessment. EU: KSC Engineering, NASA.
- 70 Yokoyama, I. (1981). A Geophysical Interpretation of the 1883 Krakatau Eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 9 (4): 359-378, March.
- 71 Thornton, I.W.B. (1997). Krakatau: The Destruction and Reassembly of an Island Ecosystem. EU: Harvard University Press.
- 72 Winchester, Simon (2003). Krakatoa: The Day the World Exploded, August 27, 1883. País: Penguin/Viking.
- 73 Francis, P. and Self, S. (1983). The Eruption of Krakatau. *Scientific American*, 249 (5): 172-187, November.
- 74 Casadevall, T.J. (1994). The 1989-1990 eruption of Redoubt Volcano, Alaska: impacts on aircraft operations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62 (1-4): 301-316, August.
- 75 Petersen, G.N. (2010). A Short Meteorological Overview of the Eyjafjallajökull Eruption 14 April–23 May 2010. *Weather*, 65 (8): 203-207, August.
- 76 Bolić, T. and Sivčev, Z. (2014). Eruption of Eyjafjallajökull in Iceland. Experience of European Air Traffic Management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2214.
- 77 Watson, E.J.; Swindles, G.T.; Savov, I.P.; Lawson, I.T.; Connor, C.B. and Wilson, J.A. (2017). Estimating the Frequency of Volcanic Ash Clouds Over Northern Europe. *Earth and Planetary Science Letters*, 460: 41-49.
- 78 Bretón, M. (2018) Las erupciones volcánicas y sus consecuencias en la Cuenca del Pacífico: Portes, revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico, tercera época, volumen 12, número 23, enero - junio de 2018 / pp. 165-177.

Mujeres investigadoras en la Universidad de Jaén

Salud M^a Bermúdez Sáez. Luna Rosales Palomino

Alumnas de 4º de ESO en el IES Antonio de Mendoza

M^a Patricia Pérez López

Profesora de Biología y Geología en el IES Antonio de Mendoza

La vocación por la carrera científica a veces nace y otras veces, se hace. Con el objetivo de despertar el interés por la investigación en niñas y adolescentes de la provincia de Jaén, la Universidad de Jaén puso marcha un proyecto titulado “*GEM EMPODERAR A LAS NIÑAS PARA APROVECHAR SU POTENCIAL DIGITAL Y EMPRENDEDOR*”, que consistía en acoger a niñas de toda la provincia para que participaran durante una semana en una investigación dirigida por una mujer científica, en lo que llamaron “Campus de Verano GEM-UJA”.

Las alumnas Salud M^a Bermúdez Saéz y Luna Rosales Palomino participaron en dos de las investigaciones propuestas, durante la semana del 19 al 23 de junio de 2.021 en las instalaciones de la Universidad de Jaén.

“Desde la pagina del Edificio Joven del pueblo vimos un anuncio en el que se animaba a niñas de la provincia, con ganas de participar en un proyecto de investigación, a ir a la Universidad de Jaén durante una semana y experimentar cómo es de verdad trabajar en una investigación científica, compartiendo los trabajos realizados por distintos grupos de investigación en ámbitos muy distintos, todos con el único fin de visualizar el papel de la mujer en la ciencia. Yo fui seleccionada para el proyecto “¿Qué esconden los humedales? Descubriendo la biodiversidad críptica a través de imágenes digitales”, mientras que Luna participó en el proyecto titulado “¿Polinización en peligro? Investigando la producción y viabilidad de los granos de polen”, comenta Salud.

Durante una semana pudieron conocer a otras niñas con intereses similares a los suyos, disfrutar del trabajo de campo y de la posterior puesta en común de las investigaciones en unas jornadas de presentación donde expusieron sus conclusiones. Además, tuvieron el honor de trabajar mano a mano con grandes investigadoras de la Universidad de Jaén. A continuación os presentamos a las que fueron tutoras de nuestras alumnas: Gema Parra Anguita y Fátima Aguilera Padilla.

Nombre de la investigadora:

M^a Gema Parra Anguita

Formación (título/s y año de obtención):

Licenciada en Biología Marina (1994)

Doctora en Ciencias del Mar (1998)

Puesto que desempeña:

Profesora Titular de Universidad. Área de Ecología. Universidad de Jaén



1. Cómo nos conocimos:

A través de proyecto GEM EMPODERAR A LAS NIÑAS PARA APROVECHAR SU POTENCIAL DIGITAL Y EMPRENDEDOR, con un proyecto de iniciación a la investigación que pretende dar a conocer la biodiversidad críptica en humedales.

2. ¿Tuvo siempre claro que quería dedicarse al mundo científico?

La verdad es que no, lo descubrí a medida que el mundo de la biología me iba sorprendiendo. A lo largo de la carrera universitaria puedes descubrir cuál es tu camino. Y el mío se fue apareciendo poco a poco en esos primeros años en la Universidad

3. ¿Qué despertó en usted esa vocación científica para dedicarse a su actual trabajo?

Las preguntas que te van surgiendo que necesitaban respuestas y que éstas no existían. La curiosidad es un pilar fundamental de la vocación científica.

4. ¿Le ha costado mucho llegar a donde se encuentra hoy a nivel profesional?

Pues realmente sí. Son muchas las horas de dedicación al estudio, al principio y luego a la investigación en sí. Pero como bien dice el refrán, “palos a gusto, saben a gloria”, es decir, que yo me lo paso bien tanto aprendiendo como investigando, por lo que esas tareas se llevan a cabo con optimismo y dedicación.

5. ¿Ha tenido usted alguna dificultad como mujer a la hora de dedicarse a la ciencia?

Principalmente a la hora de la conciliación familiar. Ante un cúmulo de responsabilidades y tareas, a veces tienes que priorizar, y en algunos casos la ciencia sale perdiendo. Aún queda camino que recorrer para conseguir un reparto equitativo de tareas domésticas y cuidados de la familia. Pero cada vez se va consiguiendo avanzar más. Una parte de la “carga” a veces la asumimos sin preguntarnos si es equitativo, directamente “nos toca” y eso hay que cambiarlo desde dentro.

6. ¿Cree que actualmente es más difícil para la mujer, en general, dedicarse a la ciencia? ¿Por qué?

Dedicarse a la ciencia no, pero sí alcanzar los niveles más altos. Esto no es una apreciación personal, nos lo dicen los datos. Por ejemplo, en la Universidad de Jaén hay solo

un 26% de catedráticas cuando en el total de personal docente e investigador las mujeres representan el 43%. Hay camino aún por recorrer para conseguir valores cercanos al 50%.

7. ¿Qué es lo que más le gusta de su trabajo?

La formación continua. Es cierto que siempre estás estudiando, conociendo nuevos protocolos, aprendiendo nuevas técnicas y eso es muy estimulante.

8. ¿Qué le resulta más difícil y/o desagradecido?

La ciencia requiere de financiación constante que solemos conseguir mediante convocatorias, nacionales o europeas, y esa labor es la más difícil. En este sentido, lo más desagradecido es emplear mucho tiempo y esfuerzo en preparar memorias para esos futuros proyectos y ver que te deniegan la financiación. Sin financiación podemos avanzar muy poco. Esa parte es para mí la más dura e ingrata.

9. ¿Qué opina de la investigación y el desarrollo de la biotecnología?

La investigación en general en España es muy buena y está fundamentada principalmente en el capital humano, personas altamente cualificadas dedicándose en cuerpo y alma a lo que más le gusta. Respecto al desarrollo de la biotecnología, nos queda mucho por avanzar y es una disciplina interesantísima para afrontar los desafíos globales, pero sí que considero que hay que hacer una reflexión respecto a los posibles impactos tanto ambientales como sociales que algunos avances biotecnológicos pueden ocasionar. Para ello es clave tener siempre en mente el principio de precaución y unos buenos cimientos éticos.

10. ¿Qué consejo le daría a una chica joven que empiece a interesarse por la carrera científica?

Que su curiosidad sea infinita, que se cuestione todo y que cultive un espíritu crítico. Sobre todo, que nunca cuestione su capacidad para realizar las tareas relacionadas con la investigación

Nombre de la investigadora:

Fátima Aguilera Padilla

Formación (título/s y año de obtención):

Licenciada en Biología (2004)

Doctora en Biología (2011)

Puesto que desempeña:

Profesora en el Área de Didáctica de las Ciencias Experimentales, Universidad de Jaén.



1. Cómo nos conocimos:

Durante el “Campus de Verano GEM-UJA”, con un proyecto para investigar la producción y viabilidad de los granos de polen.

2. ¿Tuvo siempre claro que quería dedicarse al mundo científico?

Sí, sin duda alguna. Desde muy pequeña he sido muy curiosa y observadora, cualidades importantes en la ciencia.

3. ¿Qué despertó en usted esa vocación científica para dedicarse a su actual trabajo?

Mi pasión por la naturaleza y saber cómo funcionan las cosas.

4. ¿Le ha costado mucho llegar a donde se encuentra hoy a nivel profesional?

Sí, mucho, pero cuando una persona tiene una meta debe esforzarse y ser constante para alcanzarla. La recompensa merece la pena.

5. ¿Ha tenido usted alguna dificultad como mujer a la hora de dedicarse a la ciencia?

En realidad, no. Creo que he tenido suerte en ese aspecto, puesto que siempre han valorado mis ideas y mis cualidades al igual que al resto de personas, independientemente del género.

6. ¿Cree que actualmente es más difícil para la mujer, en general, dedicarse a la ciencia? ¿Por qué?

La dificultad principal se encuentra en conciliar vida familiar y laboral, porque indudablemente vivimos en una sociedad en la que la mujer sigue teniendo el rol del cuidado de hijos/as, padres y madres o personas dependientes. En una carrera científica no puedes quedarte atrás, no puedes dejar de hacer méritos, y eso requiere tiempo y dedicación que a veces es muy difícil de llevar a buen término. Hay que seguir trabajando en esa línea para mejorar el papel de la mujer en una sociedad con igualdad real y efectiva, no teórica.

7. ¿Qué es lo que más le gusta de su trabajo?

Dedicarme a lo que más me gusta: enseñar, aprender e investigar.

8. ¿Qué le resulta más difícil y/o desagradecido?

La dificultad de tener un puesto de trabajo estable y bien valorado, sin pasar por mil concursos. La carrera científica debería simplificarse en términos burocráticos.

9. ¿Qué opina de la investigación y el desarrollo de la biotecnología?

La investigación es fundamental para que una sociedad pueda evolucionar. El conocimiento, en cualquier rama del saber, es un paso adelante.

10. ¿Qué consejo le daría a una chica joven que empiece a interesarse por la carrera científica?

Mi consejo es que aprovechen cualquier oportunidad para acercarse a la ciencia, participando, por ejemplo, en proyectos de investigación en colaboración con universidades (proyecto EXPLORA-IES, proyecto GEM, etc). Chicas, debéis luchar por vuestros sueños. Los límites sólo se los pone una misma.

“Esta semana no solo desarrollamos nuestros proyectos, sino que teníamos actividades diarias muy divertidas por el campus, como juegos y gymkhanas. La semana pasó volando, pero de verdad que valió la pena madrugar esa semana en verano para acercarnos un poquito más a la ciencia. Me ha fascinado conocer las miles de ramas que puede tener una simple investigación y lo compleja que llega a ser cualquiera de ellas. Gracias a esta experiencia, he ido descubriendo nuevas modalidades en la ciencia que sin duda me despiertan curiosidad y me encantaría aprender. En mi opinión, recomendaría completamente el campus científico GEM, sobre todo por el gran impulso que le dan a la mujer en la ciencia. Si pudiera repetir la experiencia otros años, ¡sin duda lo haría!”, concluye Luna.



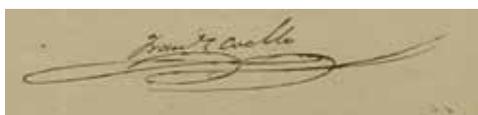
Francisco Coello: la forja de un geógrafo

José Antonio Nieto Calmaestra

Geógrafo. Asesor Técnico de la Junta de Andalucía

El pasado 26 de abril de 2022, se cumplieron 200 años del nacimiento, en Jaén, de un paisano ilustre; Don Francisco Coello de Portugal y Quesada, ingeniero militar y cartógrafo que, con su inquietud y su prolífico quehacer, contribuyó a aumentar el conocimiento geográfico y a sentar las bases de la cartografía moderna en España.

Un país, aquel de 1822, lastrado por las continuas pugnas de poder entre absolutistas y liberales que impedían un necesario despegue económico y la verdadera modernización del Estado, que no sería posible, según el propio reformismo liberal, sin un óptimo conocimiento y control del territorio. En este contexto, la Administración Pública del momento empezó a interesarse por herramientas que contribuyesen a facilitar su labor, fijándose como objetivos prioritarios: contar, lo antes posible, con un mapa topográfico, un catastro y un censo de población, utensilios decisivos para conocer la disponibilidad de recursos, la riqueza del país y su distribución territorial.



La tarea, sin embargo, no fue ni fácil ni inmediata, lo primero que se consiguió, no fue posible hasta 1857, fecha en la que se elaboró el primer Censo de Población en España. El Mapa Topográfico Nacional y el Catastro tardarían algo más en materializarse, no viéndose culminados hasta bien entrado el siglo XX, siendo crucial para ello, como se tendrá ocasión de comprobar, la labor desarrollada por nuestro personaje, todo un pionero de la cartografía y del conocimiento geográfico.

Desde muy joven, Coello se forma como militar en la Academia de Ingenieros de Guadalajara donde se licencia como Teniente en 1839, cuando apenas contaba con 17 años de edad, llegando a participar en la Primera Guerra Carlista (1833-1840), junto al General Espartero. Su pericia castrense le harían obtener la Gran Cruz del Mérito Militar (1841), pasando a ser caballero de la Orden de San Fernando.

Tras la guerra comienza una fructífera colaboración con Don Pascual Madoz en su célebre *“Diccionario geográfico-estadístico-histórico de España y sus posesiones de Ul-*

tramar”, donde se ocupaba de los detalles cartográficos. Aunque esta relación laboral se prolongaría durante mucho tiempo, en un primer momento se vio interrumpida un par de años, cuando Coello trabajó como agregado militar del ejército francés en Argelia, donde se curtió como cartógrafo elaborando un atlas de la zona.

A su vuelta de la experiencia africana, su trabajo con Madoz adquirió carta de naturaleza propia materializándose en el “*Atlas de España y sus posesiones de ultramar*” un compendio complementario al Diccionario de Madoz que tenía como objetivo cartografiar por primera vez el país, tras su recién estrenada división administrativa (1833).

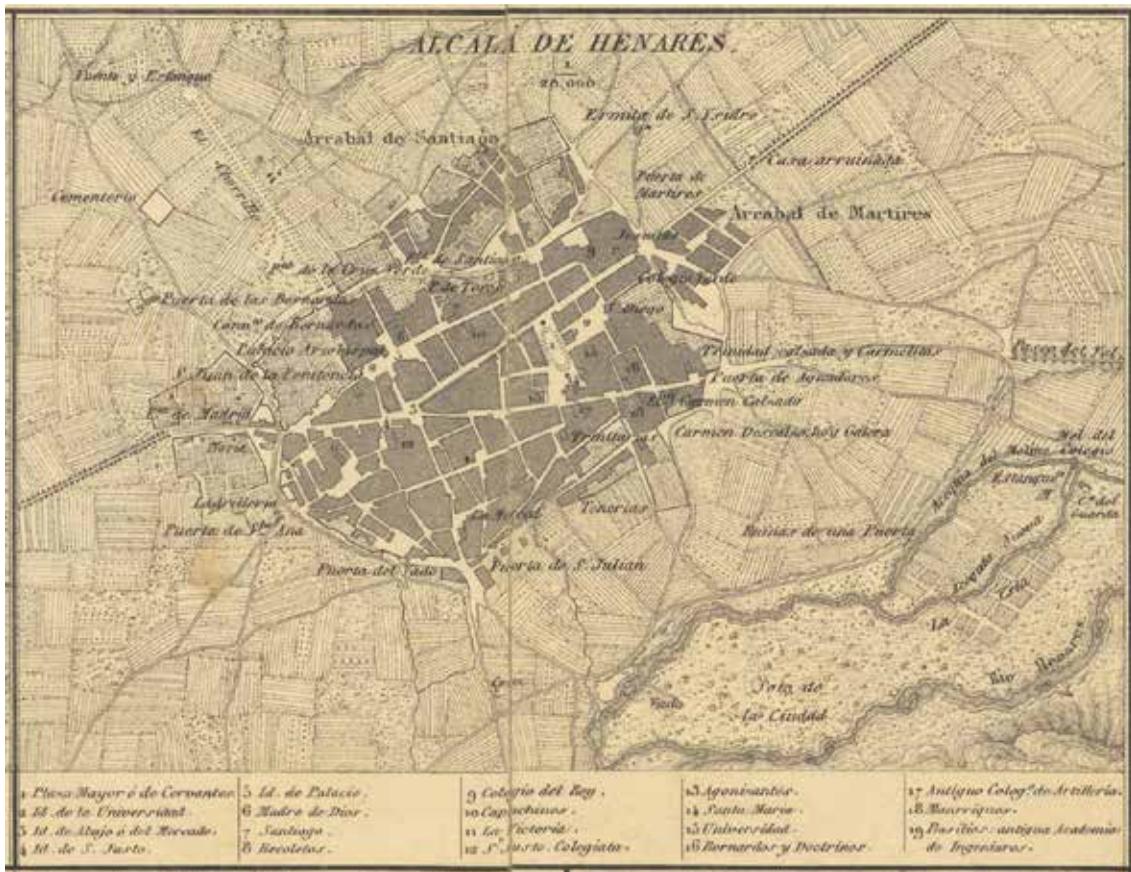
Su plena dedicación al Atlas le hace solicitar un permiso especial para compaginar las labores cartográficas con la vida castrense en la que, pese a esta licencia, continuó ascendiendo en el escalafón convirtiéndose en Teniente Coronel en 1858 y en Coronel en 1865, estatus en el que se retiró del ejército, de forma definitiva, en 1866.

El planteamiento de la magna obra, que fue el Atlas de España y sus posesiones de ultramar, era recoger mapas de todas las provincias españolas, incluyendo las colonias que por entonces se poseían (Cuba, Filipinas, etc). La escala de referencia de la obra era la 1:200.000, lo que la convierten en una producción de gran formato (100 x 75 cm). La misma, que se desarrolló entre 1841 y 1876, supuso todo un alarde técnico-científico que, lejos del mero trabajo de gabinete de muchos de sus predecesores, se apoyó en trabajos de triangulación y toma de datos in situ, además de en una ingente labor recopilatoria de documentación local y estatal depositada en distintos organismos.

El resultado fueron mapas técnicamente perfectos de gran precisión que pronto y durante años se convertirían en referencia obligada de la cartografía española constituyendo base obligada para múltiples trabajos.

Sus mapas destacan por la maestría que el autor demuestra en la representación del relieve, mediante curvas de configuración, el tratamiento de la red hidrográfica o el detalle con el que se abordaban el sistema de asentamientos o las redes viarias. En cada composición provincial, el mapa propiamente dicho se acompañaba de un conjunto de ventanas de detalle con los planos de las principales ciudades de la provincia, además de textos, datos y tablas que convertían cada hoja en un verdadero compendio del saber geográfico de cada provincia. Para su realización, además de con la asesoría de Madoz, Coello contó con un plantel de expertos locales (comisionados) que le ayudaron a perfilar cada hoja





para cuya cuidada edición contaba también con el apoyo de los mejores cartógrafos y litógrafos franceses.

Lo arduo de la empresa hizo, sin embargo, del Atlas una obra inconclusa, pues de las 65 hojas previstas, solo se publicaron 34, conservándose las minutas inacabadas de 11 hojas más. La no culminación de la obra se debió al avance y progresivo desarrollo del Mapa Topográfico Nacional cuyos trabajos y resultados (la primera hoja 1:50.000 se publica en 1875), mejoraban técnicamente los de Coello.

En este sentido, la provincia de Jaén, por ejemplo, pese a ser su lugar de nacimiento, no llegó ni tan siquiera a abocetarse conservándose tan solo los planos de detalle de las ciudades de Huelma, Quesada y Cazorla que forman parte de una composición planimétrica suplementaria junto a los planos de otras ciudades andaluzas.

Si interesantes resultan las hojas terminadas que componen el Atlas, por la gran cantidad de información que aportan y su exquisito tratamiento técnico, tanto o más interés ofrecen los bocetos de las hojas que no llegaron a terminarse por cuanto permiten documentar el proceso de trabajo que Coello seguía para su levantamiento.

En este caso, el distinto estadio de los trabajos de hojas como las de las provincias de Córdoba, Sevilla o Granada permiten acercarse a los pasos que el maestro Coello daba

para su confección. Su análisis permite comprobar que el procedimiento se iniciaba con la localización precisa de los vértices y principales localidades de la provincia que permitían articular una red de triangulación y la definición de los contornos provinciales. Posteriormente se procedía a la incorporación de la red viaria e hidrográfica, conformando una especie de esqueleto sobre el que, con posterioridad, se iban incorporando la topografía, y, conforme ésta se iba completando, las distintas texturas del mapa y una abundante toponimia. Aunque la impresión final se realizaba a una sola tinta, las minutas se trabajaban en color usándose; el azul para la hidrografía, el siena para la orografía, el verde para la vegetación o el rojo para las comunicaciones.

Pese a su enorme dedicación al Atlas, su tarea profesional no se limitó al mismo, Coello supo compaginar la elaboración de éste con una frenética actividad como consultor y como figura destacada de la intelectualidad del momento.

Fruto de ella, en 1855, realiza, por ejemplo, la memoria *Proyecto de las líneas generales de navegación y de ferrocarriles en la Península Española*, donde presenta como concibe que deberían ser los trazados de las respectivas redes sobre el territorio ibérico. Así diseña la construcción de canales en torno a los principales ríos para mejorar el riego y el transporte fluvial y, para mejorar la movilidad sobre territorio, concibe una red de ferrocarriles alejada de una perspectiva totalmente radial acentuando la importancia de determinados trazados transversales. En ambos aspectos deja entrever su vocación iberista concibiendo actuaciones conjuntas e integradoras del conjunto peninsular.

En 1858 entró a formar parte de la Comisión Estadística General del Reino donde ejerció como vocal aportando al Anuario de la institución una certera reseña de la geografía de España. De igual forma participó en la redacción de la Ley de Medición del Territorio (1859) surgida para ordenar y coordinar las múltiples, y a veces inconexas, actividades relativas al conocimiento geográfico que realizaban los distintos ministerios. Como forma de optimizar estos trabajos, la ley apuesta por la profesionalización y el adiestramiento técnico, siendo Coello promotor de la Escuela Técnico Práctica de Ayudantes, que dirige en 1860, convirtiéndola en una referencia fundamental para la formación de topógrafos.

Convertida la Comisión en Junta General de Estadística (1861), se encargó a Coello una de sus secciones, la topográfico-catastral, nombrándosele al poco tiempo Director General de Operaciones Geográficas, uno de los puestos de mayor responsabilidad. Desde esta posición Coello, además de iniciar la triangulación geodésica de España, crucial para el levantamiento del mapa topográfico, emprendió otro de los proyectos más importantes en su carrera; el impulso del Mapa Topográfico Nacional que él concebía, indiscutiblemente, unido al Catastro.

La minuciosidad y el preciosismo requerido por el trabajo planteado por Coello, que normativizó la forma de proceder en un par de reglamentos, y los elevados costes económicos del mismo hicieron inviable la continuidad de unos trabajos topográfico-catastrales que, aunque se iniciaron, tuvieron un breve rodaje.

Su proyecto de mapa topográfico-catastral pecó quizá de ambicioso pues planteaba su levantamiento a escala 1:2000, al tiempo que la división del territorio en cuadrículas de 1 Km² como base para su parcelación y elaboración de las correspondientes cédulas catastrales. La complejidad técnica del procedimiento, unida a los cambios políticos sobrevenidos en esas fechas y a los recortes presupuestarios, llevaron a nuestro personaje a su dimisión, viéndose frustrado su gran proyecto, del que solo quedó como muestra la cartografía topográfico-catastral de apenas medio centenar de municipios del entorno de Madrid, suficientes para calibrar la enjundia de los trabajos y su buen hacer. En este sentido, se puede decir que la cartografía catastral española dejó pasar una oportunidad de oro pues, además de retrasarse algunos años en su realización, optó por un modelo de catastro mucho más sencillo.

Aunque esta cuestión le hace apartarse de la Administración, su valía científica y profesional le hacen merecedor de un sillón en la Real Academia de la Historia de la que pasará a formar parte en 1874, siendo también el principal impulsor de lo que, primero sería la Sociedad Geográfica de Madrid (1876), y más tarde la Real Sociedad Geográfica, institución que Coello concebía como un altavoz científico del conocimiento geográfico. Convencido colonialista fue asimismo cofundador en 1883 de la Sociedad Española de Africanistas y Colonialistas.

Como puede apreciarse, además de un trabajador incansable y un científico convencido, Coello tenía, ante todo, un espíritu inquieto que lo llevó, antes de su muerte en 1898, a ser un personaje reconocido en la España de la época y una figura de talla internacional en una rama del saber; la cartografía, a la que aportó toda su experiencia y conocimiento convertidos a la postre en simiente y abono de la actual cartografía española, pues tanto el Mapa Topográfico Nacional como el Catastro moderno bebieron de sus fuentes.

Referencias bibliográficas.

- Colaboradores de Wikipedia. Francisco Coello de Portugal y Quesada [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2021 [fecha de consulta: 22 de mayo del 2022]. Disponible en <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Francisco_Coello_de_Portugal_y_Quesada&oldid=139104058>.
- Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía (2022). *Francisco Coello de Portugal y Quesada. El cartógrafo andaluz del siglo XIX*, Sevilla.
- Consejería de Obras Públicas y Transportes (1998) *La nueva cartografía en España del siglo XVIII al XX*. Sevilla.
- Consejería de Obras Públicas y Vivienda (2010) *Andalucía, la imagen cartográfica hasta fines del siglo XIX*. Sevilla.

40 años del VIH. La importancia de protegerse

Marina Castillo. Samuel Prados. África Toro

Alumnado de 3º de ESO en el IES Antonio de Mendoza

Mª Patricia Pérez López

Profesora de Biología y Geología en el IES Antonio de Mendoza

Este año se celebra el 40 aniversario del descubrimiento del virus VIH. Tras cuarenta años desde los primeros casos, y a pesar de todos los avances que se han conseguido durante estas cuatro décadas, la infección por VIH sigue siendo un problema para la salud pública. Más de 10 millones de personas siguen sin recibir tratamiento en África, Asia y Latinoamérica; cada año hay un millón y medio de nuevos seropositivos y fallecen otros 800.000.

Hablar de VIH parece algo del pasado, ya no es un tema de conversación cotidiana ni causa alarma, pero es importante estar bien informado acerca de este virus y sus consecuencias sobre el organismo, y por supuesto se necesita seguir investigando sobre él porque el VIH sigue matando.

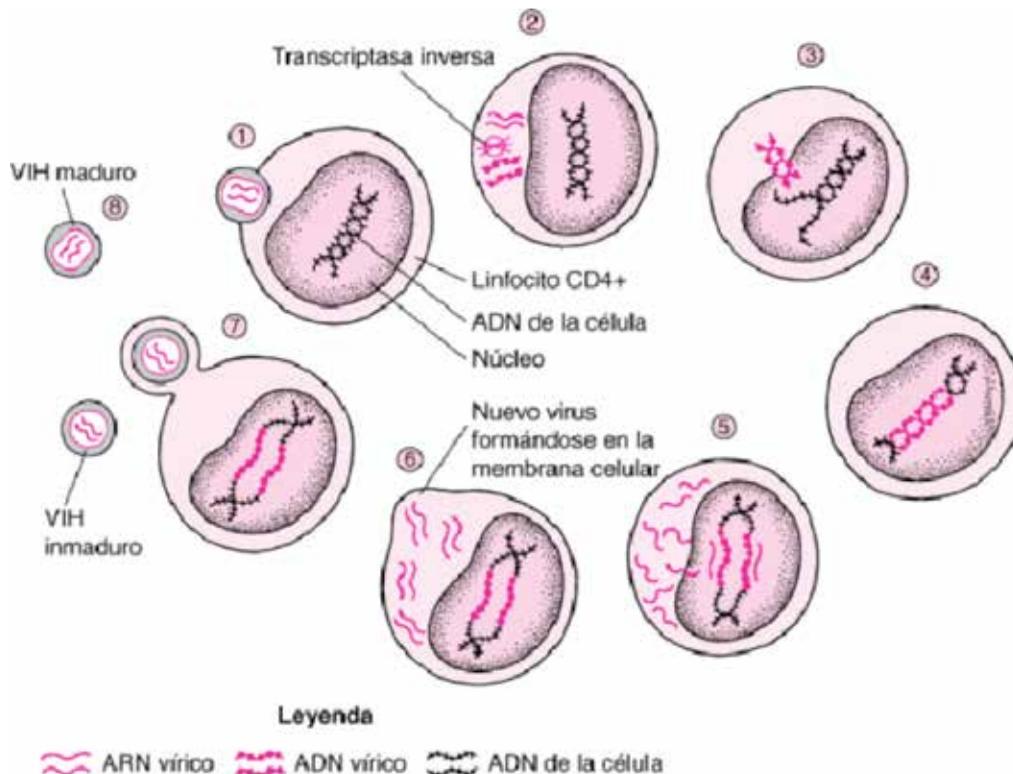


Fuente: Investigadoras en el Laboratorio de Bioseguridad de Nivel 3 de IrsiCaixa. Barcelona.
<https://elpais.com/eps/2021-11-26/40-anos-de-vih-la-epidemia-de-la-muerte-y-de-la-vida.html>

1. ¿QUÉ ES EL VIH?

El VIH, o virus de la inmunodeficiencia humana, es un retrovirus, eso significa que es un virus que usa el ARN para almacenar su material genético pero cuando hace copias de su material genético lo hace en forma de ADN, el cual es capaz de introducirse en el ADN de la célula infectada. Cuando el virus entra en el organismo, daña al sistema inmunitario destruyendo un tipo de glóbulo blanco (los linfocitos CD4+) que ayuda a combatir infecciones, lo que nos pone en riesgo de sufrir infecciones y ciertos tipos de cáncer. Las personas infectadas por VIH pueden desarrollar la enfermedad llamada SIDA (síndrome de inmunodeficiencia humana). Es importante recordar que estar infectado por VIH no significa tener SIDA. De hecho, casi el 25% de las personas infectadas por VIH no lo saben.

El SIDA es la enfermedad que se produce como consecuencia de una infección grave por el VIH, la cual se caracteriza por un síndrome grave de inmunodeficiencia en el que el enfermo o la enferma tiene un alto riesgo de sufrir otras infecciones o enfermedades, a las que se llaman enfermedades oportunistas. Normalmente el diagnóstico de SIDA tiene lugar cuando se sufren estas enfermedades oportunistas o cuando se tiene un recuento de linfocitos CD4+ por debajo de 200 células/mm de sangre. Las personas con SIDA tienen una alta carga viral y por tanto son muy contagiosas, y su pronóstico es grave si no se ponen en tratamiento. Sin tratamiento la esperanza de vida de un enfermo de SIDA es aproximadamente de 3 años.



Fuente: <https://www.msmanuals.com/es-es/hogar/infecciones/infecci%C3%B3n-por-el-virus-de-la-inmunodeficiencia-humana-vih/infecci%C3%B3n-por-el-virus-de-la-inmunodeficiencia-humana-vih>

2. HISTORIA DEL VIH

- El 5 de junio de 1981, en Estados Unidos se informó sobre una forma rara de neumonía entre jóvenes homosexuales de California. Se trata de la primera alerta sobre el SIDA, aunque en ese momento la enfermedad carecía de nombre. El término SIDA (Síndrome de Inmunodeficiencia Adquirida) apareció en 1982 en España.

- En enero de 1983, el equipo del Instituto Pasteur de París anunció el descubrimiento del virus asociado a la linfadenopatía (LAV), que luego se conoció como Virus de Inmunodeficiencia Humana (VIH). Los investigadores creían que «podría estar implicado» en el SIDA.

- Un año más tarde, el 23 de abril de 1984, Estados Unidos anunció que el especialista estadounidense Robert Gallo había hallado la «causa probable» del SIDA, con un retrovirus bautizado como HTLV-III.

- El galán del cine clásico estadounidense Rock Hudson murió a los dos años de contraer el SIDA y se convirtió en la primera víctima famosa de la enfermedad en 1985.

- El 20 de marzo de 1987 se presentó el AZT, el primer medicamento antirretroviral. Se trataba de un tratamiento costoso y de importantes efectos secundarios.

- En noviembre de 1991 el cantante Freddie Mercury falleció a causa de una bronconeumonía complicada por el sida.

- En 1994, el sida se convirtió en la primera causa de muerte entre los estadounidenses con edades entre 25 y 44 años.

- En 1994 el ensayo clínico conocido como «076» indicó que el AZT reducía las tasas de transmisión del virus de madre a hijo en dos terceras partes.

- Los años 1995 y 1996 estuvieron marcados por la aparición de nuevas clases de medicamentos. Se agregaron nuevos antirretrovirales al tratamiento. Fue el inicio de las combinaciones de diferentes medicamentos, que se mostraron muy eficaces.

- Se creó el Programa Conjunto de Naciones Unidas sobre el Sida (ONUSIDA) en 1996. Desde entonces, lideró e inspiró la innovación y la colaboración a nivel mundial, nacional y local para dar respuesta al VIH/SIDA.

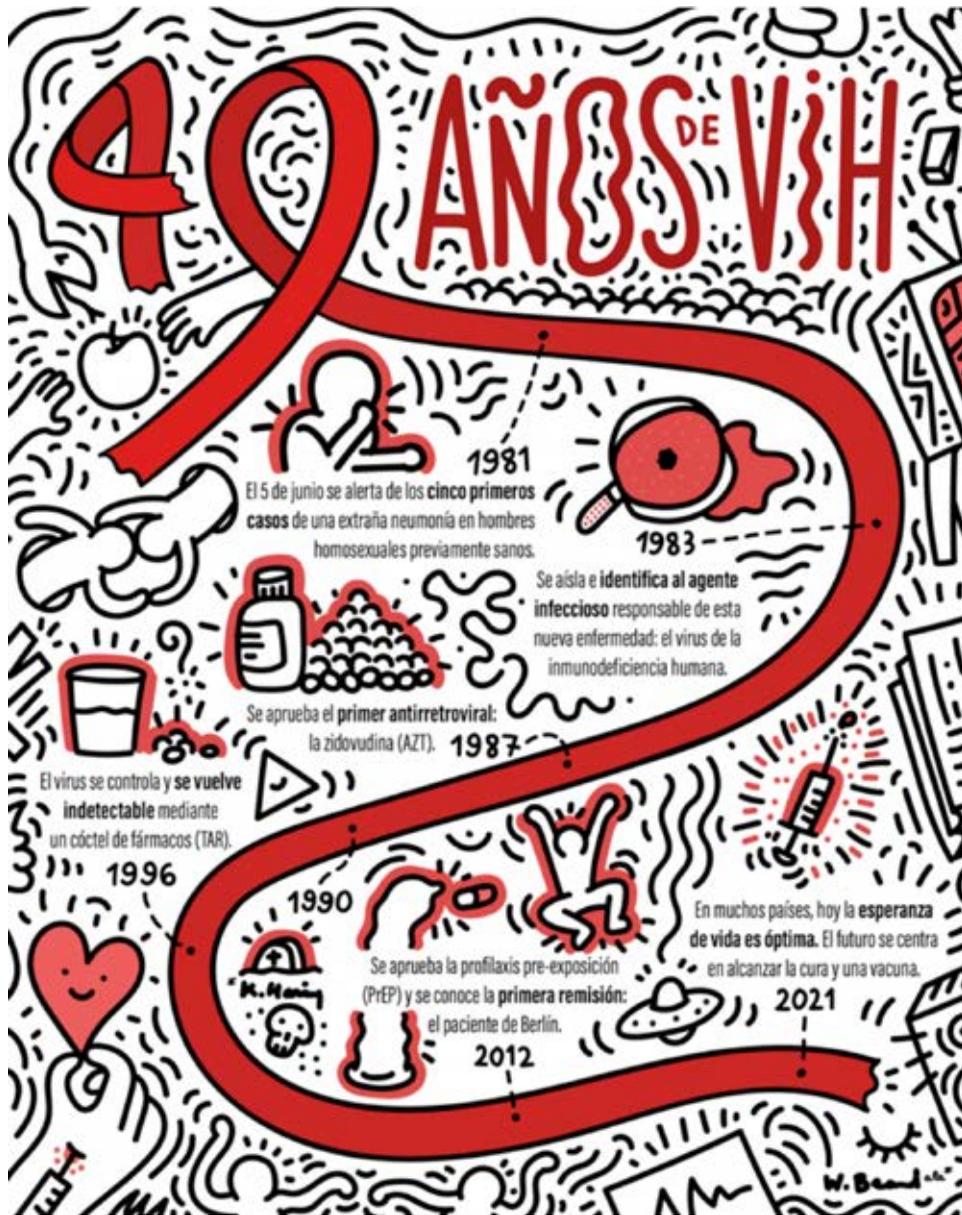
- En 2002 la Administración de Alimentos y Medicamentos de los EEUU (FDA) aprobó el uso de los test rápidos, que ofrecen resultados con el 99,6% de exactitud en tan sólo 20 minutos.

- En 2007 se llevaron a cabo los primeros ensayos de Profilaxis Pre Exposición (PrEP) para reducir el riesgo de adquisición del VIH entre personas que estuvieron expuestas al virus.

- El 16 de julio de 2012 se autorizó en los Estados Unidos el primer tratamiento preventivo, el antirretroviral Truvada.

- Por primera vez en 2017 más de la mitad de los enfermos de SIDA en todo el mundo son tratados. ONUSIDA planteó para 2020 la estrategia 90-90-90 (90% de las personas con VIH diagnosticadas, 90% de ellas en tratamiento y 90% de quienes están en tratamiento con carga viral indetectable).

- En 2019 científicos lograron que una persona superase la infección de VIH. Se trata de un hombre que no muestra rastros del VIH después de 19 meses. Los expertos que presentaron el hallazgo son cautos al hablar de cura y se refieren a «una remisión de largo plazo».



Fuente: Ilustración de Wearbeard que rinde homenaje a una de las personas fallecidas por SIDA, el artista xKeith Haring (1958-1990). <https://www.agenciasinc.es/Visual/Ilustraciones/1981-2021-40-anos-de-pandemia-por-VIH>

3. LA INFECCIÓN POR VIH

La infección del VIH se produce a través de estos 6 pasos:

- **Acoplamiento y fusión de la membrana:** cuando el VIH entra en contacto con nuestro organismo, lo primero que hace es atacar a los linfocitos CD4+. Una vez estos unidos, activa a otros correceptores (es un receptor de las células que se une a una molécula además de un receptor primario) para llevar a cabo la fusión con la membrana.
- **Transcripción inversa:** el virus introduce su ARN y un tipo de enzima dentro del linfocito T. Esta enzima se encarga de transformar el ARN en ADN.

- **Integración:** El ADN del VIH es conducido al núcleo de la célula infectada donde la enzima se encarga de integrar el ADN del virus al ADN de la célula. A partir de este paso, la célula puede producir nuevas copias del VIH.

- **Transcripción:** cuando la célula infectada se reproduce, una enzima llamada polimerasa se encarga de crear cadenas de proteínas del virus para crear nuevas copias del VIH.

- **Ensamblaje:** la enzima proteasa corta las cadenas de proteínas del virus en proteínas individuales, las cuales, se ensamblan para generar nuevas copias del virus.

- **Gemación:** las copias nuevas de la célula infectada están listas para empezar a infectar otras células.

¿CÓMO SE TRANSMITE?

- A través de relaciones sexuales sin usar protección con una persona que padece de esta enfermedad.
- Compartiendo agujas, por ejemplo para el consumo de drogas.
- La madre le pasa la enfermedad al bebé durante el embarazo, parto o lactancia.



Fuente: <https://www.cdc.gov/hiv/spanish/basics/hiv-transmission/not-transmitted.html>

SIGNOS Y SÍNTOMAS

- Fiebre y escalofríos
- Sarpullidos
- Sudores nocturnos
- Dolores musculares
- Pérdida de peso
- Náuseas
- Diarrea
- Infecciones
- Fatiga
- Ganglios linfáticos inflamados
- Úlceras en la boca

TRATAMIENTO

Aún no existe una cura pero se puede tratar con medicamentos, que reduce el riesgo de transmitir el virus a otras personas.

Llevar un estilo de vida saludable, cuidarse y recibir atención médica regular puede ayudar a disfrutar de una mejor calidad de vida en personas con VIH.

¿CÓMO PODEMOS PREVENIRLA?

- Haciendo uso del preservativo.
- Con revisiones de VIH y otras ITS (infecciones de transmisión sexual).
- No consumiendo drogas.
- No compartiendo agujas.



Fuente: <https://www.tucanaldesalud.es/es/tusaludaldia/articulos/prevenir-transmision-virus-vi>

WEBGRAFÍA

1. <https://medlineplus.gov/spanish/hiv aids.html>
2. <http://caextremadura.org/vihsida/historia-del-vih>
3. <https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/enfLesiones/enfTransmisibles/sida/queesSidaVih.htm>
4. <https://www.unaids.org/es/frequently-asked-questions-about-hiv-and-aids>
5. <https://www.huesped.org.ar/informacion/vih/como-se-transmite-y-como-se-previene/>
6. <https://www.tucanaldesalud.es/es/tusaludaldia/articulos/prevenir-transmision-virus-vi>
7. <https://www.cdc.gov/hiv/spanish/basics/hiv-transmission/not-transmitted.html>
8. <https://www.agenciasinc.es/Visual/Ilustraciones/1981-2021-40-anos-de-pandemia-por-VIH>
9. <https://www.msmanuals.com/es-es/hogar/infecciones/infecci%C3%B3n-por-el-virus-de-la-inmunodeficiencia-humana-vih/infecci%C3%B3n-por-el-virus-de-la-inmunodeficiencia-humana-vih>
10. <https://elpais.com/eps/2021-11-26/40-anos-de-vih-la-epidemia-de-la-muerte-y-de-la-vida.html>

100 años de insulina. Uno de los grandes descubrimientos del siglo XX

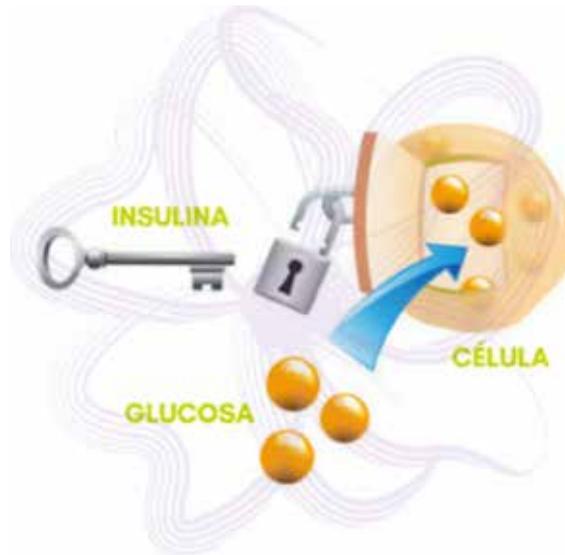
Claudia Jiménez Cano

Alumna de 3º de ESO en el IES Antonio de Mendoza

M^a Patricia Pérez López

Profesora de Biología y Geología en el IES Antonio de Mendoza

En 2021 se conmemoró el centenario del descubrimiento de la insulina. La insulina es una hormona fabricada y liberada por el páncreas, concretamente por las células beta de los islotes de Langerhans, en respuesta a la glucosa sanguínea. La insulina es la “llave” que las células necesitan para poder dejar entrar la glucosa de la sangre. Las células necesitan esta glucosa para fabricar su energía, a través de la respiración celular.



Fuente: <https://escuelapacientes.riojasalud.es/diabetes/educacion-pacientes/347-que-es-la-diabetes>

Un defecto en la producción de insulina supone un aumento de la glucosa en la sangre, lo que causa una enfermedad llamada diabetes. En la diabetes tipo 1 el problema es que el páncreas no fabrica suficiente insulina, mientras que la diabetes tipo 2 se debe a la imposibilidad de usar correctamente la insulina fabricada. Un tercer tipo de diabetes es la llamada diabetes gestacional, que puede ser desarrollada por mujeres embarazadas.

Si la diabetes no se trata se genera un exceso continuado de glucosa en la sangre, el cual puede causar serios problemas como son problemas oculares, nerviosos o renales. También está relacionado con enfermedades cardíacas, derrames cerebrales y la necesidad de amputar un miembro.

Un reciente estudio de CIBERDEM (Centro de Investigación Biomédica en Red de Diabetes y Enfermedades Metabólicas Asociadas) ha estimado la incidencia de diabetes en España en 11,6 casos/1.000 personas-año. Eso significa que cada año aparecen alrededor de 386.000 nuevos casos de diabetes en la población adulta solamente en nuestro país.

Conociendo todo esto parece más que acertado celebrar estos cien años del descubrimiento de la insulina, un descubrimiento que aumentó enormemente la esperanza de vida de los pacientes de diabetes, que sin insulina podrían morir en semanas mientras que hoy en día tienen una vida prácticamente normal.

1. ¿Cómo y cuándo se descubrió la insulina?

La insulina fue descubierta en Toronto en el verano de 1921, por Sir Frederick Grant Banting, gracias a una serie de experimentos realizados en la universidad de esta ciudad. Desde tiempo atrás, Banting había sentido curiosidad por esta enfermedad, siguiendo de cerca las investigaciones de Edward Albert Schafer (fundador de la endocrinología como rama médica). Sin embargo, los intentos de este de solucionar esta falta de insulina producida por la enfermedad administrando a los pacientes extractos de páncreas, habían fracasado.

Por fortuna, en el año 1921 y, tras leer una publicación de un tal Moses Baron (donde se habían sacado jugosas conclusiones), y haber conseguido un laboratorio y ayudante sensacionales (gracias a MacLeod, profesor de fisiología en la universidad donde había realizado sus anteriores experimentos), en nueve semanas el investigador y Charles Best (su reciente mano derecha) consiguieron ligar los conductos pancreáticos de varios perros, y lograron un extracto de páncreas libre de tripsina. Tras su reciente éxito, decidieron provocar una diabetes experimental en otros perros y una vez desarrollada la enfermedad, comprobaron que la administración del extracto de páncreas de los primeros perros reducía o anulaba la glucosuria en segundos.



Fuente: <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/banting.htm>

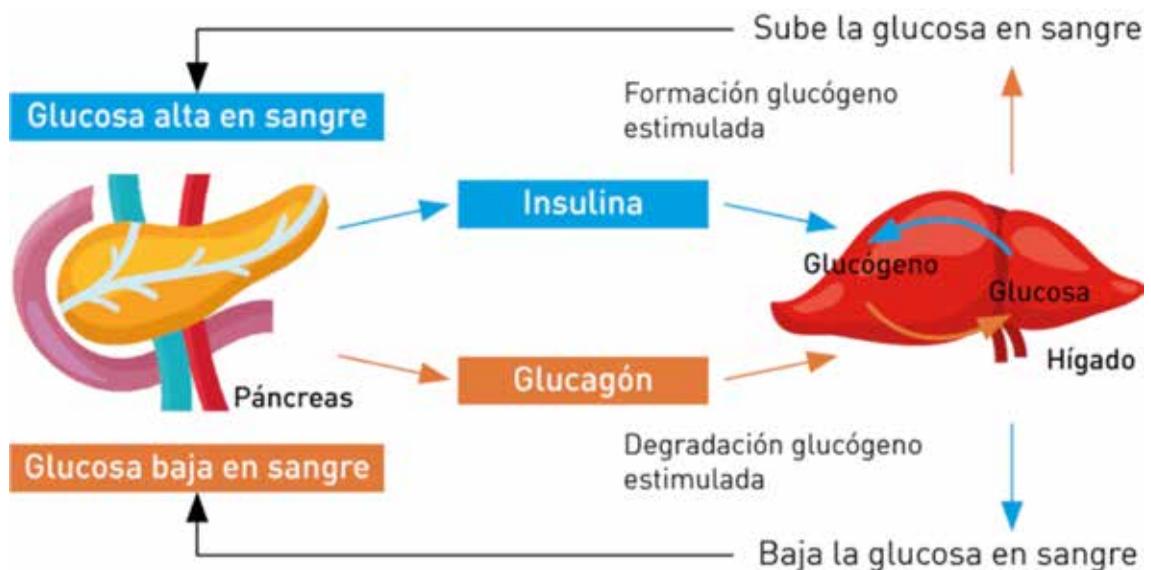
2. ¿Qué supuso ese descubrimiento para la población?

Según afirma José Antonio Saz, portavoz de la Federación Española de Diabetes (FEDE), el descubrimiento de la insulina fue un hito fundamental. Y es que, a pesar de estar celebrando su centésimo aniversario, esta hormona sigue en desarrollo cada día, con el fin de poder aportarles a las personas diabéticas la mayor comodidad posible, ya que todavía quedan algunos aspectos a mejorar.

Como avances podemos destacar que poco a poco esta hormona está perfeccionándose cada vez más de manera que se ha conseguido que molecularmente sea parecida a la que se produce de manera natural, pero con modificaciones que prolongan su vida, la creación de insulinas biosintéticas (obtenidas gracias a la manipulación genética) o el hecho de que ya no se utiliza la de origen animal.

Por otra parte, los métodos para controlar la glucosa en sangre han sufrido también una enorme evolución; aunque todavía se sigue innovando en este ámbito, ya que lo que se espera con el paso del tiempo es tener una lectura continua a lo largo del día, para poder tomar mejores decisiones en la dieta.

Sin embargo y a pesar de tener todavía algunos “cabos sueltos”, la insulina salva millones de vidas. Ya que para que la glucosa pueda pasar a las células y ser usada como energía se necesita de esta, dado que es la que interactúa para que la glucosa entre en la unidad morfológica y funcional de la vida. Cuando se produce un aglutinamiento de la glucosa en la sangre, lo que significa que no ha podido entrar en las células, puede causar graves consecuencias tanto a largo como a corto tiempo si no disponemos de un tratamiento adecuado.



Fuente: <https://www.douglaslabs.es/blog/wp-content/uploads/infografia.png>

3. ¿En qué momento de la investigación estamos ahora?

Durante los últimos 50 años se ha avanzado mucho en las investigaciones para el tratamiento de las diabetes, dado que ya se comprende mucho mejor la enfermedad (lo que ha ayudado significativamente a que haya pruebas alentadoras en marcha).

Los/as investigadores/as no descansan, y esto lo podemos observar revisando los resultados que hemos obtenido en estos últimos años, como cuando en 1994 comenzó formalmente la carrera para implantar islotes pancreáticos, en 1999 cuando se logró trasplantar islotes pancreáticos de un cadáver a un paciente, o en 2014 cuando se consiguió producir islotes pancreáticos a partir de células madre.

Pero lo que los científicos han buscado en las últimas décadas es un camino para introducir islotes de células beta en el organismo. Recientemente una compañía de San Diego ideó un nuevo dispositivo de microencapsulación llamado “ViaCyte”. Este lleva células beta, derivadas de células madre. Se implantó en la región lumbar y ha generado grandes expectativas.

Sin embargo, lo que los y las pacientes esperan es una cura, cuya investigación está lejos de encontrar una solución definitiva. A pesar de ello, la opción todavía no se descarta, puesto que poco a poco se están introduciendo terapias con el fin de erradicar la enfermedad. La más esperanzadora a día de hoy es la terapia genética.

Se pueden agrupar los estudios que se están realizando en cuatro grupos. Por un lado, se está tratando de promover la formación o regeneración de las células beta o precursores de éstas. Por otro lado, el objetivo es modular la respuesta metabólica de la glucosa y la secreción de insulina. Otro de los grupos de investigación se basa en modificar la resistencia a la insulina que se genera en la diabetes tipo 2. Y por último se investiga para



Fuente: <https://tinyurl.com/y2rvrebe>

proteger las células beta de la respuesta inmunitaria desencadenada en la diabetes tipo 1 y que no sean destruidas.

La terapia génica para curar la diabetes todavía debe superar algunas barreras en la investigación básica, pero se presenta como una buena alternativa a los métodos convencionales. Mediante la biotecnología se pretende curar la enfermedad restaurando la liberación endógena de insulina o modificando las concentraciones de glucosa en sangre, así como desarrollando distintas estrategias adaptadas a las necesidades de los pacientes con diabetes tipo 1 o 2.

WEBGRAFÍA

1. <https://www.fundaciondiabetes.org/general/articulo/301/celebramos-juntos-los-100-anos-del-descubrimiento-de-la-insulina>.
2. <https://www.analesdepediatria.org/es-lineas-investigacion-el-tratamiento-curativo-articulo-13048403>
3. <https://mejorconsalud.as.com/ultimas-investigaciones-tratamiento-diabetes/>
4. https://www.diariodesevilla.es/sevilla/nuevos-tratamientos-curacion-diabetes-investigacion-sevilla_0_1526847488.html
5. <https://medlineplus.gov/spanish/diabetes.html#:~:text=La%20diabetes%20es%20una%20enfermedad,el%20cuerpo%20no%20produce%20insulina>.
6. <https://www.ciberisciii.es/noticias/ciberdem-publica-los-resultados-del-estudio-diabetes-sobre-la-incidencia-de-la-enfermedad-en-espana#:~:text=El%20estudio%20ha%20estimado%20la,diabetes%20en%20la%20poblaci%C3%B3n%20adultas>.
7. <https://www.ciberdem.org/>
8. https://articulos.sld.cu/diabetes/files/2009/07/descubrimiento_de_la_insulina.pdf
9. <https://tinyurl.com/yxrgjw7p>.
10. <https://tinyurl.com/yyvxor92>.
11. <https://sites.google.com/site/escotetlopezfgtpr02/-cuales-son-los-beneficios-que-ha-producido-la-insulina-en-los-diabeticos>
12. <https://mejorconsalud.as.com/ultimas-investigaciones-tratamiento-diabetes/>
13. <https://www.elsevier.es/es-revista-offarm-4-articulo-terapia-genica-curar-diabetes-13046057>
14. <https://tinyurl.com/y2rvrebe>

80 años del Plutonio. ¿Qué sabemos de él?

Macarena Jiménez Martínez, Raquel Cano Nieto

Alumnas de 3º de ESO en el IES Antonio de Mendoza

Rosa M^a Cuenca Trujillo

Profesora de Física y Química en el IES Antonio de Mendoza

1. INTRODUCCIÓN

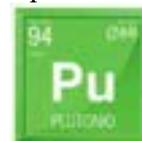
En febrero de 2021 se cumplieron 80 años de la síntesis artificial del plutonio. El plutonio es un elemento químico altamente radiactivo, que es de gran interés en el campo nuclear. Es un metal gris plateado brillante al principio, al igual que el níquel, pero se oscurece cuando le da el aire, formando una capa opaca cuando se oxida. En la imagen se puede observar un botón de plutonio.



Imagen de archivo.
Imagen de nuclear
rayo-191979934

Es muy duro y prácticamente no dúctil, a no ser que se mezcle con otros metales para hacerlo más blando. Tiene un bajo punto de fusión (640 ° C) y un inusualmente alto punto de ebullición (3228 ° C). A diferencia de la mayoría de los metales, no es un buen conductor del calor o electricidad y no es magnético. El hecho de que se comporte así tiene que ver con un número de electrones desapareados en su última capa que no es fijo, es decir un extraño comportamiento hace que fluctúe entre, 4, 5 ó 6 electrones en su última capa, de ahí la dificultad de que dicho electrones se alineen para producir un campo magnético

Su símbolo químico es el Pu, su número atómico 94 y es del grupo 3 o familia del Escandio (tierras raras y actínidos), que es el 1er grupo de la Tabla periódica de los elementos de transición. Sabemos que todos los elementos de la tabla periódica que tienen un número mayor que 84 son extremadamente radiactivos y además ocupa el número 3 de los 5 metales más radiactivos existentes, junto con el Polonio(Po), Radio (Ra), Torio(Th) y Uranio(U). Es un metal con 16 isótopos (mismos átomos que el original pero con distinto núcleo por diferir en su número de neutrones), siendo los más importantes el plutonio-239 y el plutonio-238, todos ellos son radiactivos y además artificiales, ya que se forman en el combustible de los reactores nucleares durante su funcionamiento, siendo casi imposible encontrar alguna parte en la naturaleza.



El plutonio es una de las sustancias más tóxicas para el ser humano, afecta además al sistema inmunitario y provoca esterilidad, e inhalado o ingerido en cantidades considerables ocasiona el envenenamiento agudo por radiación y la muerte. La exposición más peligrosa para la salud se produce como resultado de un escape o accidente radiactivo.

Esto se debe a la liberación de las ondas alfa, que no atraviesan la piel, pero si se inhalan, una pequeña cantidad de estas ondas es suficiente para provocar un cáncer de pulmón; por lo tanto al ser muy radiactivo sus consecuencias duran muchísimo tiempo, por ejemplo, el plutonio-239 tiene una vida media de 24100 años. Esto quiere decir que en este tiempo se habrán desintegrado la mitad de sus átomos, al proceso también se le llama decaer un isótopo radiactivo en otro isótopo llamado hijo y así sucesivamente hasta que termina en un isótopo más estable. Las cadenas de desintegración radiactivas contemplan todas estas posibilidades. En nuestro caso el plutonio-239 pertenece a la cadena de desintegración natural de la serie del Actinio y su producto de desintegración es el uranio-235.

2. CONTEXTO HISTÓRICO

En 1934, el grupo de investigación de Universidad de Roma liderado por Enrico Fermi anunció el descubrimiento del elemento número 94 al bombardear el núcleo de uranio con neutrones. En realidad, Fermi malinterpretó los resultados. Lo que el equipo había obtenido no era un nuevo elemento sino una mezcla de bario y kriptón producto de la fisión del núcleo de uranio ya que éste capturaba un neutrón y se fragmentaba en dos, con una reacción en cadena que liberaba gran cantidad de energía, hecho que explicarían en 1938 Lise Meitner y Otto Hahn (científicos alemanes) poco antes de que comenzara la 2ª Guerra Mundial y que después supuso el desarrollo de la bomba nuclear durante dicha etapa de la historia mundial.

El plutonio se obtuvo por primera vez en 1940, cuando Glenn T. Seaborg, Edwin M. McMillan, J. W. Kennedy y A. C. Wahl bombardearon uranio con deuterio en Berkeley. El descubrimiento se mantuvo oculto hasta el final de la II Guerra Mundial por cuestiones de seguridad, ya que la fisión del plutonio-239 podía desencadenar una reacción en cadena. Bastaba calcular la masa crítica y sintetizar la cantidad suficiente para desarrollar una bomba atómica. La primera bomba atómica que se hizo explotar contenía plutonio como elemento de fisión. Denominada Trinity, se detonó el 16 de julio de 1945 cerca de Alamogordo, Nuevo Mexico. Su diseño incluía un iniciador de polonio y berilio que garantizaron la reacción en cadena y la explosión. El arma, que en su totalidad pesaba más de 4 toneladas, contenía 6,2 kilogramos de plutonio en su núcleo. Aproximadamente el 20% del plutonio utilizado en el arma Trinity se fisiónó y generó una explosión que liberó una energía equivalente a aproximadamente 20000 toneladas de TNT. Un diseño idéntico fue utilizado en la bomba atómica «Fat Man», lanzada sobre Nagasaki, Japón, el 9 de agosto de 1945, matando a 70 000 personas e hiriendo a otras 100 000.

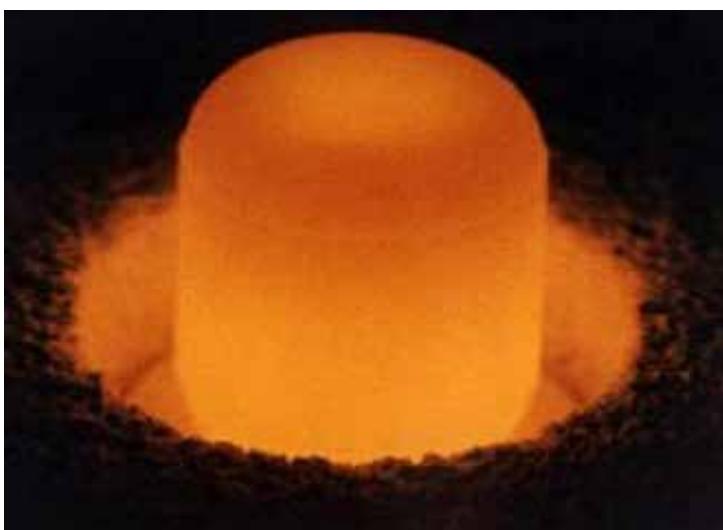
3. USOS DEL PLUTONIO EN LA ACTUALIDAD:

A pesar de su toxicidad, el plutonio es importante en la investigación del universo, por ejemplo, el plutonio-238 sigue siendo actualmente el mejor combustible para alimentar satélites que se envían al espacio profundo en regiones donde los paneles solares ya no pueden recibir la luz del sol de manera eficiente y tampoco existen ni gasolineras ni enchufes. Una de las ventajas más importantes en comparación con otro combustible

utilizado como prototipo (polonio-210) es que su vida media es de unos 88 años frente a los 138 días del polonio. Durante 50 años, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) ha utilizado este radioisótopo como combustible en generadores termoeléctricos de radioisótopos instalados en satélites como Pioneer 10 y 11, Voyager 1 y 2, Cassini-Huygens y New Horizons, así como los distintos rovers enviados a la Luna y a Marte, entre otros.

Estos sistemas de energía de radioisótopos, se conocen con la abreviatura **RPS** y han demostrado ser una fuente de calor segura ya que dicho combustible es un óxido de plutonio, que se utiliza en forma de pastilla densa, similar al material cerámico. De esta forma, se rompería en pedazos grandes que evitaría que el material sea absorbido por el cuerpo si se ingiere. Sin embargo, las existencias de plutonio-238 en los Estados Unidos se han reducido cada vez más, y puesto que no es un isótopo natural en el planeta, los futuros proyectos espaciales de la NASA se ven en peligro. Ahora, el Laboratorio Nacional de Oak River en Tennessee lo ha empezado a producir para abastecer las misiones planetarias de la NASA, como el *Perseverance Rover* en Marte.

En Rusia, se produce Pu-238 en los reactores industriales de Rosatom de la Asociación de Producción Mayak de Ozersk y también los reactores de neutrones rápidos de la central nuclear de Beloyarsk producen hasta 100 kg al año. El 23 de enero de 2018 esta noticia revolucionó el mundo de la generación de electricidad en ambientes extremos como la superficie de Marte “La NASA desarrolla un pequeño reactor nuclear para sus misiones espaciales”



Una pastilla de combustible de plutonio-238, brillando con el calor que produce. Crédito: Departamento de Energía de EE. UU.

Por el contrario, podemos encontrar varias desventajas que nos afectan. Una de ellas es que se pueden fabricar bombas nucleares con este componente. Es más, es el mejor componente para fabricarlas. En un mundo en el que vivimos, la amenaza nuclear está al día y “por la culpa” de este elemento se pueden crear bombas que con su explosión llevarían a unos niveles de radioactividad insostenibles para el ser humano y el planeta.

Esto nos lleva a otro de los inconvenientes del plutonio: el gran impacto medioambiental que tiene. En el medio ambiente, por ser un elemento metálico y pesado, el plutonio contamina el suelo a través de la “lluvia radiactiva” tras un escape o vertido. Asimismo,

puede entrar en las aguas superficiales y su movimiento lento y hacia abajo termina alcanzando las aguas subterráneas, que más tarde podrían llegar incluso al mar, contaminando allá por dónde va. El plutonio, concretamente el Pu-239, tiene un periodo de semidesintegración de 24.100 años y sólo al cabo de 20 periodos de semidesintegración (482.000 años), se puede decir que será inofensivo para el medio ambiente según el grupo de ecologistas Científicos y Técnicos por un Futuro No Nuclear. Además en un estudio publicado en 2021 en la revista *Science of The Total Environment* sobre la medición de plutonio en corales en zonas protegidas, se han medido concentraciones de plutonio preocupantes. Es decir la radiactividad liberada durante la 2ª Guerra Mundial así como a finales de los años 50 y principios de los 60 ha dejado huella en todo el planeta puesto que fueron liberados unos 2900 kg de Pu-239 quedando demostrado el impacto del ser humano sobre el medio marino.

4. CURIOSIDADES DEL PLUTONIO.

- No se encuentra en la naturaleza, es un material sintético.
- Es un subproducto de reacciones nucleares que tienen lugar en los reactores.
- Tiene punto de fusión a 639°C y de ebullición a 3232°C.
- Deja de ser peligroso para el medio ambiente al cabo de 482.000 años.
- Debe su nombre al planeta enano Plutón, el dios del inframundo o los infiernos de la mitología romana.
- Se conocen en total, 16 isótopos diferentes, pero el principal y más usado es el plutonio-239

5. INVESTIGACIONES ACTUALES

- Aleaciones de plutonio con galio y cobalto por sus propiedades superconductoras, aunque dicho efecto dura poco. Estas aleaciones se consiguen agregando el metal al plutonio fundido. En otros casos dependiendo el metal (condiciones reductoras) se puede añadir el plutonio en forma de compuestos (óxidos o haluros) para tratar directamente en forma pura evitando así su toxicidad. Las aleaciones de plutonio-galio tienen muchas ventajas, sobre todo debido a su ductilidad y moldeabilidad, pues el plutonio en estado fundido es más denso que en estado sólido. También se sabe que estable entre -75 y 475°C
- Contaminación por radioactividad artificial en medios marinos y el estudio de su impacto: según la revista *Science of The Total Environment*, en un estudio de un grupo de físicos polacos, se han encontrado altos niveles de radiación en los sedimentos poco profundos de los glaciares árticos, debido a las pruebas con armas nucleares que se realizaron durante la 2ª guerra mundial y también debido al desastre de la central nuclear rusa de Chernobyl. Particularmente se ha encontrado cesio-137 (claramente relacionado con el desastre de Chernóbyl), americio-241, bismuto-207, plutonio-239 y plutonio-240, se sabe que fueron liberados unos 2900 kg de plutonio. La abundante lluvia en Escandinavia hace que los contaminantes atmosféricos lleguen hasta los glaciares. Otro estudio publicado en la misma revista, destaca la medición de plutonio en

corales de México, lo cual constituye un marcador muy valioso para crear una base de datos de contaminación por radiación. La base de datos contiene actualmente más de 528000 mediciones de radiactividad marina, que servirá para la evolución de la radiación y el impacto humano ocasionado.

Para estudiar dicha contaminación en profundidad y mitigar las consecuencias, el OIEA (Organización Regional para la Protección del Medio Marino de Naciones Unidas) utiliza técnicas nucleares y recursos científicos muy vanguardistas en los laboratorios de radioecología de Mónaco y Austria.

Aquí en España, en el Centro de Investigación del Oceanográfico de Valencia también se está llevando a cabo un estudio innovador con instrumentación nuclear y un radio-marcador (calcio-45) que estudiará la cantidad que absorben las especies marinas (no es perjudicial para ellos) en relación al cambio climático.

- El CSIC (consejo superior de investigaciones científicas) junto con la Universidad de Valencia desarrolla y patenta un detector de radiación que simula las reacciones nucleares en las estrellas, ya que en estos procesos, aparecen fotones en forma de neutrones (uno de los componentes del núcleo del átomo junto con los protones) así como radiación gamma. Dicho dispositivo podrá ser utilizado en seguridad nuclear ya que podrá identificar radiación nuclear oculta conteniendo uranio y plutonio.

Otra aplicación es la médica mediante la hadronterapia (terapia con protones del núcleo del átomo) contra el cáncer, puesto que en el recorrido de los componentes nucleares hacia un tumor se producen rayos gamma, que al analizarlos con este detector se podrá analizar con precisión su eficacia energética en el tumor.

BIBLIOGRAFÍA

01. https://www.iaea.org/sites/default/files/35304983843_es.pdf
02. <https://rps.nasa.gov/about-rps/about-plutonium-238/>
03. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00295450.2021.1913035>
04. <https://cumbrepuebloscop20.org/energias/combustibles/plutonio/>
05. <https://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia-plutonio-cambio-historia-humanidad-hace-77-anos-20180223110933.html>
06. <https://compraoro.org/plutonio/>
07. <https://www.classicistranieri.com/wikipediaforschoolses/wp/p/Plutonium.htm>
08. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts143.html
09. <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/elementos-quimicos/plutonio/>
10. <https://rps.nasa.gov/about-rps/about-plutonium-238/>
11. <https://www.iaea.org/es/servicios/materiales-analiticos-de-referencia-para-los-laboratorios>
12. <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/el-csic-desarrolla-un-detector-compacto-y-portatil-con-aplicaciones-medicas-y-en>

Dos años de pandemia Covid-19 en Alcalá la Real

Antonio Heredia Rufián

Profesor de Geografía e Historia (jubilado) IES Antonio de Mendoza

Antonio Quesada Ramos

Profesor de Biología. IES Zaidín Vergeles. Granada

INTRODUCCIÓN

Las calamidades, especialmente las epidemias, han sido acontecimientos de gran importancia en la historia de las poblaciones humanas, que incluso han llegado a modular su crecimiento. Algunas, como la peste negra en la Edad Media o el cólera en el siglo XIX, diezmaron de forma notoria a las poblaciones europeas. En este caso estuvieron causadas por bacterias y su importancia remitiría con el tiempo con el descubrimiento de los antibióticos; no ha habido por ello brotes epidémicos importantes de enfermedades bacterianas en el mundo civilizado desde mediados del siglo XX, cuando se extiende el uso de estos antimicrobianos. No es el mismo escenario para las epidemias causadas por virus. Estos han sido responsables de grandes mortandades a lo largo de la historia, y ejemplos de ello han sido la peste antonina en la época romana -se cree que estuvo causada por el virus de la viruela-, la fiebre amarilla o la gripe; de todas esas enfermedades ha quedado constancia en los registros de Alcalá la Real.

Y cuando se creía que las graves pandemias eran cosa del pasado, determinados brotes como los causados por el SARS-Cov-1 o el MERS alertaban de lo que finalmente llegó a ser la realidad que hemos vivido durante los dos últimos años. Este periodo será recordado por la historia por la grave pandemia que hemos padecido y que nos ha hecho vivir situaciones similares a las que hubo hace un siglo con la gripe de 1918, con la que habitualmente se ha comparado. Y a pesar de la normalización, debida por un lado a la vacunación -todo un hito en la historia de la ciencia y de la humanidad el hecho de haberla conseguido en un tiempo tan corto- y, por otro, a la evolución del virus hacia formas más transmisibles, aunque menos letales, aún no podemos decir que la hayamos superado; todavía las noticias nos hablan de un número considerable de contagios y de fallecimientos. Casi con toda seguridad, como ha sucedido con otros patógenos antes, el coronavirus se quedará con nosotros en una convivencia en la que virus y humanos nos habremos acostumbrado a coexistir sin que aquel nos cause graves efectos, algo similar a lo que sucede con la gripe estacional.

Un breve recordatorio nos lleva a finales de 2019, cuando se detectó en Wuham (China) un brote de neumonía de etiología desconocida que posteriormente se relacionó con un coronavirus emparentado con otros virus de murciélagos. Rápidamente la enfermedad se extendió por un mundo muy comunicado y, ya desde una perspectiva más próxima, el 31 de enero de 2020 se detectaba el primer positivo en España. El primer fallecimiento

se produjo en Valencia, el 12 de febrero. El 11 de marzo, la Organización Mundial de la Salud reconoció la Covid-19 como una pandemia y tres días después, el 14 de marzo, el Gobierno de España declaró el estado de alarma, una de cuyas acciones más impactantes fue el confinamiento que sufrimos los ciudadanos. A partir de entonces hemos vivido brotes sucesivos de la enfermedad, en lo que han constituido seis oleadas a las que habría que añadir la que para algunos epidemiólogos es la séptima.

A lo largo de los últimos años nos hemos referido en esta revista a distintas epidemias, como las de cólera o viruela del siglo XIX o la de gripe de 1918. En este caso vamos a acercarnos a la pandemia de Covid-19, una vez que se han cumplido dos años de su inicio. En esta ocasión comentaremos los datos correspondientes a nuestro municipio, principalmente a los contagios, defunciones (cifra que más ha afectado a la ciudadanía) y a la tasa de incidencia a 14 días.

Las fuentes documentales consultadas han sido principalmente los informes COVID-19 diarios de la Consejería de Salud y Familias de la Junta de Andalucía que hemos recogido personalmente desde principios de octubre de 2020, así como las actualizaciones diarias del ministerio de Sanidad. Para fechas anteriores hemos acudido a datos facilitados por el Ayuntamiento, a nuestras anotaciones personales y a los medios de comunicación locales (Alcalá la Real Información, Alcalá la Real Ideal y Alcalá la Real Diario Jaén). Los datos de mayo a septiembre de 2020 los hemos conseguido gracias a la colaboración de Rafael Montañés López que a su vez los ha tomado de <https://github.com/Pakillo/COVID19-Andalucia>.

DESARROLLO

Al igual que en la población española, Alcalá la Real ha sufrido las seis oleadas descritas para el resto de España. A lo largo de ese periodo de tiempo (a fecha 25 de marzo de 2022) se han producido 61 defunciones.

Haciendo una valoración global de los datos se observa que el mes con más nuevos casos, con diferencia, debido al alto grado de contagio de la variante Ómicron, ha sido enero de 2022 con 865, en la llamada sexta ola. Le siguen, con más de 200 contagios mensuales: noviembre 2020 con 398 (segunda ola), abril 2021 con 397 (cuarta ola), octubre 2020 con 313 (segunda ola), diciembre 2021 con 276 (sexta ola), agosto 2021 con 230 (quinta ola), julio 2021 con 217 (quinta ola), febrero 2022 con 213 (sexta ola) y febrero 2021 con 201 (tercera ola). Queremos resaltar que sobre los primeros meses, marzo y abril de 2020, no hay muchos datos y los que hay son incompletos, ya que al principio se hacían pocas pruebas de diagnóstico de infección activa (PDIA). Según algunos medios de información, solo se detectaba uno de cada diez contagios.

Por el contrario, los meses con menos casos coinciden con la parte final de la primavera y el verano de 2020 (como ya hemos dicho, en esta época se realizaban pocas pruebas de detección) y con los meses de octubre, noviembre y septiembre de 2021 (5, 9 y 17).

A 25 de marzo de 2022 el número de casos confirmados en Alcalá asciende a 3810, el 17,62% de la población. Porcentajes parecidos tienen la provincia de Jaén (18%) y Andalucía (16,5%). Esta cifra es mayor a nivel de España, que alcanza el 24%.

En relación con las defunciones destaca el mes de noviembre de 2020, en la segunda ola, con diez registros. Recordamos que esta fue en Alcalá la Real más virulenta que en el resto de España, pues llegamos a alcanzar una incidencia a 14 días de 1184 casos por cada 100.00 habitantes el 12 de noviembre, mientras que en España se quedó mucho más baja, 529 el 9 de noviembre. Otros meses con registros altos son abril y diciembre de 2020, así como febrero de 2021 con seis fallecimientos; y marzo de 2020 y enero y abril de 2021 con cinco. También hay varios meses en los que no hay defunción alguna; en gran parte corresponden con el verano de 2020 y verano y otoño de 2021.

El total de muertes en nuestro municipio, a 25 de marzo de 2022, asciende a 61. El índice de letalidad, relación entre fallecidos y contagiados, es del 1,60%, superior al de la provincia de Jaén (1,15%), Andalucía (0,95%) y España (0,90%). Esta situación, merece un estudio específico, que por el momento no es posible ya que no hay acceso a datos imprescindibles para explicar las causas de estas diferencias tan significativas.

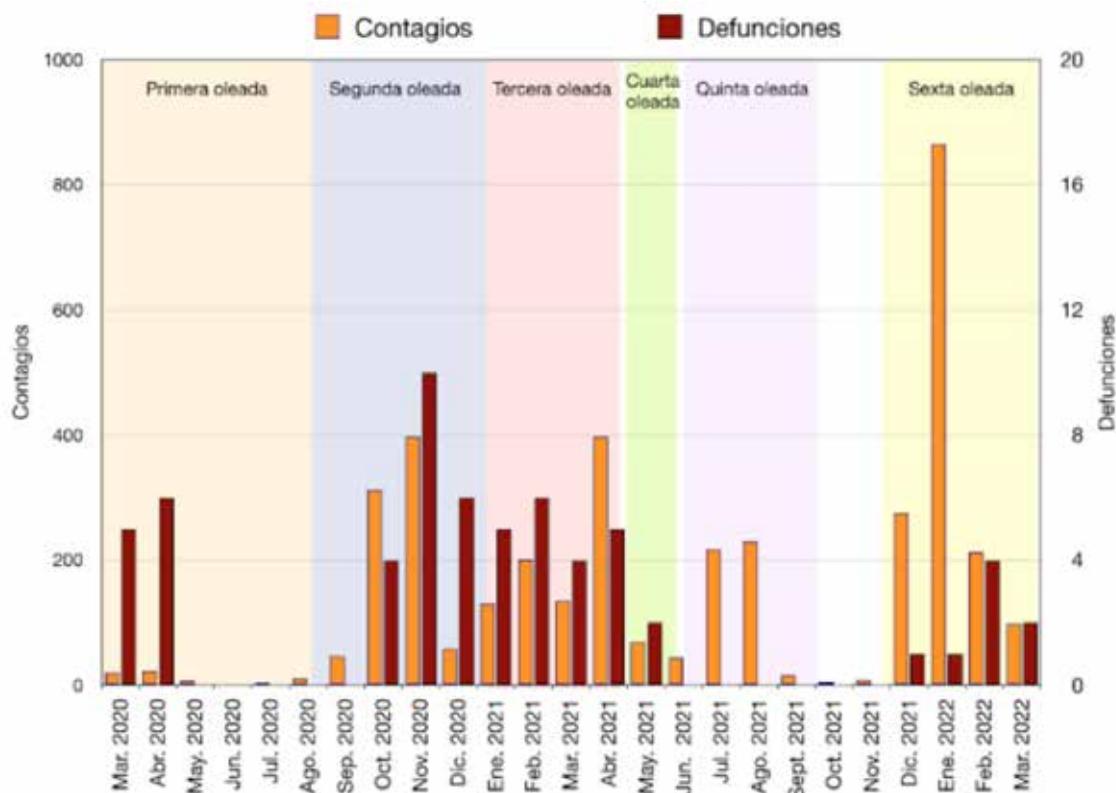


Figura 1. Evolución mensual del número de contagios y fallecimientos en Alcalá la Real entre marzo de 2020 y marzo de 2022.

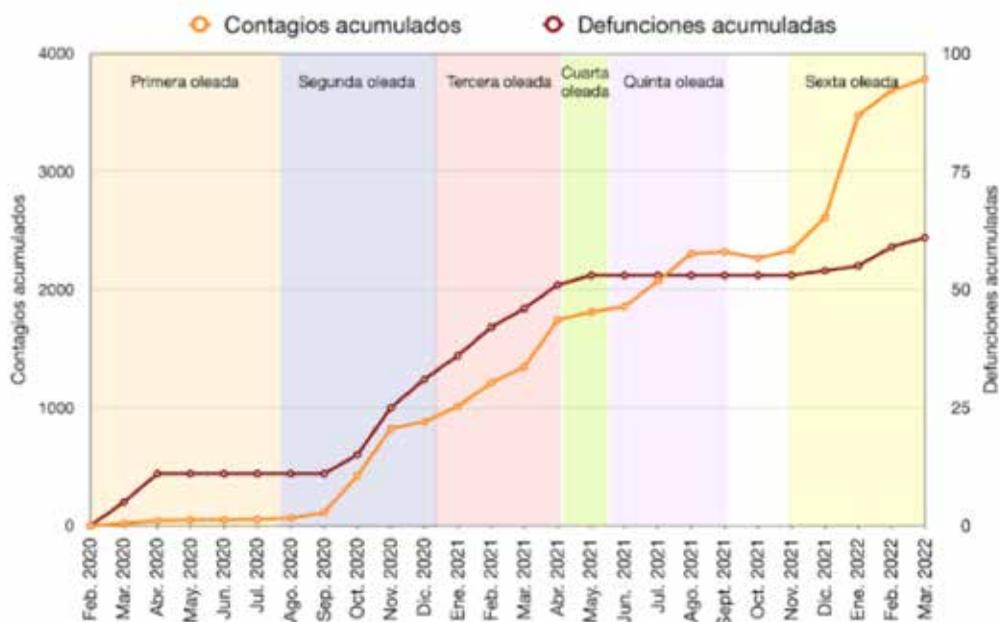


Figura 2. Evolución mensual de las frecuencias acumuladas de contagios y fallecimientos en Alcalá la Real entre marzo de 2020 y marzo de 2022.

En Alcalá la Real, al igual que en Andalucía y en España, se han distinguido seis oleadas, que analizamos seguidamente. En la **primera**, del 14 de marzo a mediados de agosto, las cifras oficiales son 53 casos confirmados y 11 fallecimientos. Destacan, casi por igual, los dos primeros meses: marzo (20 casos y 5 muertes) y abril (22 y 6). Recordamos que los contagiados debieron ser muchos más pues entonces se hacían muy pocas pruebas diagnósticas de infección activa (PDIA). En mayo se inicia el descenso (7) y apenas si hay casos en los dos primeros meses de verano: junio (0) y julio (4). Agosto con 11 nuevos casos lo podemos considerar como un mes de transición. A destacar que desde mayo no se produce ninguna defunción. Desde una perspectiva genética, los principales grupos causantes de la pandemia son los denominados clados o familias genéticas SEC7 y SEC8, que corresponden a cepas que circulaban por China al comienzo de la pandemia. Recordamos que el 14 de marzo de 2020 el Gobierno, reunido en Consejo de Ministros extraordinario, aprobó la declaración del estado de alarma (mecanismo previsto en el artículo 116 de la Constitución Española) en todo el territorio nacional por un periodo de 15 días¹. Esta situación pasó por seis prórrogas y finalizó el 21 de junio de 2020 a las 00:00 horas.

Al igual que ocurre en toda España, las consecuencias de una mayor movilidad y de un aumento de las relaciones familiares y sociales durante las vacaciones estivales de 2020 no se hacen esperar. En septiembre hay un aumento significativo de casos (47) que nos indica claramente que estamos en una nueva fase de ascenso de positivos, la **segunda ola**, en la que la variante predominante en España fue la 20E (también llamada B.1.177, con

¹ Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, por el que se declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19 (BOE, nº 67, 14 de marzo de 2020): <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-3692>

una mutación adicional en la proteína S, la que el virus utiliza para penetrar en las células humanas). Este incremento hace que el Gobierno decreta un nuevo estado de alarma el 25 de octubre, que es prorrogado del 9 de noviembre al 9 de mayo de 2021².

Esta oleada ha sido la más mortal en nuestro municipio con 816 casos y 20 defunciones, destacando los meses de noviembre con 398 contagios y 10 fallecimientos, y octubre con 313 y 4 respectivamente. El 12 de noviembre la tasa de incidencia a 14 días alcanza su pico (1184,9). A partir de esa fecha se inicia un descenso de casi dos meses, que en el día de Nochebuena es de 92 y tiene su punto más bajo el 8 de enero (41,7); pero estaba claro que las fiestas de Navidad, Año Nuevo y Reyes, al igual que ocurrió en toda España, nos traerían un cambio de tendencia.

La llamada **tercera ola** es en Alcalá la Real más tardía que en nuestro país. El 11 de enero se inicia una subida clara de la tendencia acumulada, no tan fuerte como la de la segunda ola, que llega a su valor máximo el 10 de febrero (552,8), cifra muy por debajo de las tasas de España (899,9), Andalucía (915,3) y la provincia de Jaén (873,6) dos semanas antes. A partir de esa fecha se inicia un descenso, con algunas interrupciones, que alcanza su valle el 15 de marzo (175). En esta fase sobresale el mes de febrero con 201 casos y 6 defunciones, segundo mes con más muertes, junto con abril y diciembre. A nivel de España hay que destacar el alto número de fallecimientos –hay días en que se supera los 900- y, aunque se inicia con las variantes de la segunda ola finalmente se apareció una nueva variante, la alfa.

En la fecha antes citada, un año después del comienzo del estado de alarma en España, el municipio alcalaíno tiene 1261 casos confirmados (5,8% de su población), porcentaje inferior al de los municipios de Jaén (7,04%) y Linares (7,31%) y ligeramente superior al de otros municipios de la provincia con más de 20 000 habitantes: Andújar (4,86%), Úbeda (5,62%) y Martos (5,20%). En cuanto a la tasa de incidencia acumulada a 14 días (175) es superior a la provincial (89), andaluza (121,7) y española (128,9), pues el descenso en Alcalá la Real se produce a un ritmo menor del que lo hace en esos territorios. Nos llama la atención el hecho de que no habiendo tenido un ascenso desorbitado como ha ocurrido en otros lugares, luego cuesta más trabajo bajar.

Lo anterior quizá se pueda explicar porque, como se ha dicho antes, la ola se inicia con las mismas cepas del verano y se justifica por la relajación de las medidas en las vacaciones de Navidad. Durante los primeros meses de 2021 la cepa alfa, con mayor transmisibilidad pasó a ser la dominante siendo responsable de un 85% de los casos a nivel nacional³.

² Ver R.D. 926/2020, de 25 de octubre, por el que se declara el estado de alarma para contener la propagación de infecciones causadas por el SARS-CoV-2. (BOE, nº 282, 25 de octubre de 2020): <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2020-12898>

³ García Marín, A. M., Chiner Oms, A., González Candelas, F., Comas, I., López, M.G. y Coscolla, M. (2021). Lo que nos enseña la epidemiología genómica sobre las olas de COVID-19 en España (y cómo evitar una nueva ola). En: <http://seqcovid.csic.es/lo-que-nos-ensena-la-epidemiologia-genomica-sobre-las-olas-de-covid-19-en-espana-y-como-evitar-una-nueva-ola/>

Tras dos semanas de cierto estancamiento, la tasa de incidencia a 14 días inicia un incremento significativo y en poco más de un mes se llega a la cresta de la cuarta ola (1054,9) el 19 de abril de 2021. Destaca este mes con 397 contagios y 5 fallecimientos. La fase descendente también se produce a un ritmo rápido, que alcanza su valor más bajo el 26 de mayo (50,7). Esta oleada, al igual que la anterior, es la de menor duración, algo más de dos meses. En España, la prevalencia de la variante alfa sigue siendo significativa.

El día 7 de abril de 2021 el Ayuntamiento dio a conocer que concedía, por unanimidad de todos los grupos políticos, la Medalla de Oro de la Ciudad a los sanitarios del municipio. La Corporación comunica en las redes sociales, que con esta concesión quiere resaltar la ejemplaridad profesional de estos profesionales y el esfuerzo diario por tratar de salir de esta crisis sanitaria y de paliar las consecuencias sociales y económicas que la misma conlleva. Recordamos que unos meses antes, el 3 de junio de 2020, se concedió el Premio Príncipe de Asturias a la Concordia a los sanitarios españoles.

La siguiente oleada, **la quinta**, coincide en gran parte con el verano de 2021. Tras la estabilización del mes de junio, se produce una subida en julio y agosto, mes este último en el que se llega a la cresta el 12 de agosto (898,2). En septiembre se produce un importante descenso de la tasa de incidencia a 14 días que llega a su punto más bajo el 15 de octubre, fecha en la que se registra una incidencia cero, algo que no se conseguía desde el principio de la pandemia. Esta incidencia se mantiene durante diez días. Los meses con mayor registro de contagios son julio con 217 y agosto con 230. El dato más positivo es la ausencia de defunciones, que se mantiene en 53. La variante que empieza a predominar en la mayoría de las Comunidades Autónomas en este periodo es la delta.

Durante el otoño de 2021 y el invierno de 2022 se desarrolla la **sexta ola**, que es la que más contagios registra (1459), que representan algo más de un tercio del total de contagios oficiales; destacando, como ya hemos indicado, el mes de enero con 865 casos. En estos meses se vuelve a incrementar el número de fallecidos, que pasa de 53 a 61. La cresta (2492,1), máxima tasa de incidencia de toda la pandemia, se alcanza el 7 de enero de 2022. El valor más bajo (208,1) se produce el 21 de marzo. Cuatro días después, fecha en la que cerramos este estudio, la tasa es de 282,1. A partir del 28 de marzo cambia la metodología de recuento de contagios, que limita la vigilancia de los casos confirmados a personas con factores de vulnerabilidad o asociadas a ámbitos vulnerables y las que precisan hospitalización. En esta oleada la variante predominante fue la ómicron.

Si comparamos la evolución de la COVID-19 en Alcalá la Real con la habida en Andalucía y España observamos ciertos paralelismos y también algunas diferencias. Las crestas y los valles de las distintas oleadas las podemos observar en la siguiente tabla y gráfico. No aparecen los de la primera por las razones ya indicadas. Recordamos que los primeros meses, primavera de 2020, coinciden con el inicio del estado de alarma y los confinamientos domiciliarios; la información diaria que nos trasladaba el doctor Fernando Simón; la falta de material de protección que tenían nuestros sanitarios, muchos de

ellos acabaron infectados e incluso murieron; los aplausos de la población a estos profesionales; las muertes de nuestros ancianos en las residencias...

OLAS	MÍNIMA VALLE	MÁXIMA CRESTA	MÍNIMA VALLE
1 ^a			4,62 (12 agosto 2020)
2 ^a	13,88 (13 agosto 2020)	1184 (12 novbre 2020)	41,7 (8 enero 2021)
3 ^a	97,2 (11 enero 2021)	552,8 (10 febrero 2021)	175 (15 marzo 2021)
4 ^a	188,9 (16 marzo 2021)	1054,9 (19 abril 2021)	50,7 (26 mayo 2021)
5 ^a	55,3 (27 mayo 2021)	898,2 (12 agosto 2021)	0 (15 octubre 2021)
6 ^a	4,6 (18 octubre 2021)	2492,1 (7 enero 2022)	208,1 (21 marzo 2022)

Tabla 1. Tasa de incidencia a 14 días en las distintas olas en Alcalá la Real: valles y crestas.

Entre los paralelismos de las distintas olas en Alcalá la Real y España hay que decir que coinciden bastante en el tiempo con diferencias en algunas ocasiones de varios días, como máximo dos semanas. Sí encontramos diferencias significativas en la intensidad de las mismas. Es el caso de la segunda, cuarta y quinta ola, que en nuestro municipio llega a alcanzar una incidencia a 14 días de 1184, 1054 y 898, mientras que en España es más baja: 529, 235 y 702 respectivamente. Muy significativa es la diferencia de la cuarta ola, que algunos medios llamaron olita, pues la incidencia en España no pasa de 235, mientras que en Alcalá la Real fue de 1054,9. Esta tasa fue también muy superior a la registrada en la provincia de Jaén (364) y Andalucía (259). Sería interesante estudiar esta situación, pero los datos de los que disponemos actualmente no nos lo permiten.

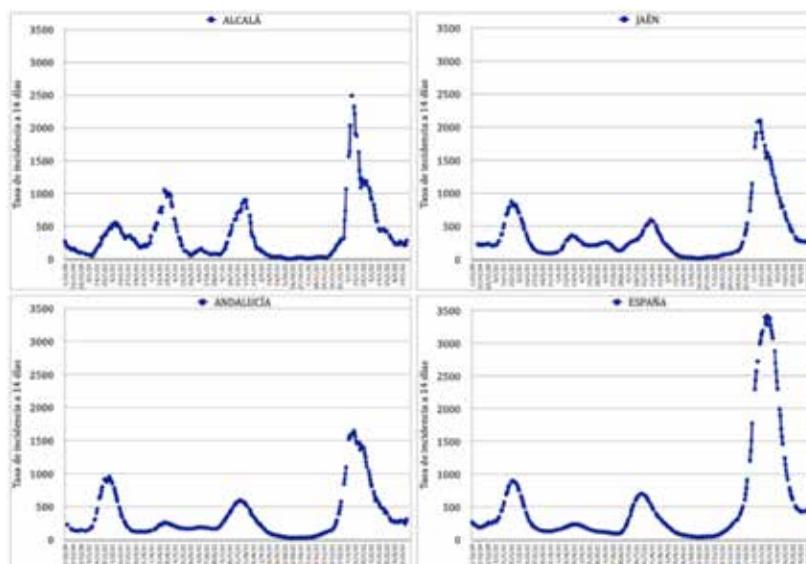


Figura 3. Evolución de la tasa de incidencia de covid-19 a 14 días en Alcalá la Real, Jaén, Andalucía y España.

Lo contrario ocurre en la tercera ola (invierno 2021), cuando en España se llegó a alcanzar una incidencia de 899 el 27 de enero, mientras que en nuestro municipio la cresta

se alcanzó el 10 de febrero con 552 casos por cada cien mil habitantes. Superior fue también la incidencia en la provincia de Jaén (873) y en Andalucía (915).

Situación parecida se vuelve a dar más recientemente, en la sexta ola (invierno 2022). En Alcalá la Real la incidencia máxima (2492), la más alta, con diferencia, de toda la pandemia, se alcanzó el 7 de enero. Dos semanas después se registró en España la cifra más alta de esta ola (3418), y también de toda la pandemia. Igualmente se alcanzaron valores máximos en la provincia (2105) y en Andalucía (1647).

Afortunadamente, y gracias al éxito del proceso de vacunación, el ritmo de crecimiento de las defunciones no ha sido tan alto como el de los contagios. Recordamos que este proceso arrancó en España el 27 de diciembre de 2020 cuando se inoculó la vacuna a una anciana de Guadalajara, Araceli Hidalgo. Quince meses después, el 89,6% de los alcalaínos, el 87% de los andaluces y el 84,3 % de los españoles tienen completa la pauta de vacunación. Estos porcentajes aumentan algunos puntos más si solo se considera la población mayor de 12 años.

CONCLUSIONES

Como se dice en el título del artículo, nos enfrentamos ya a dos años de pandemia de COVID-19, y aún no se puede decir que haya terminado. La situación de normalización que vivimos puede dar la falsa sensación de que todo ha pasado, aunque realmente no es así y debemos seguir manteniendo nuestras precauciones. Tampoco es así a nivel global, donde hay países que aún siguen con sus efectos. No es descartable en absoluto la aparición de nuevas variantes que, dada la globalidad actual, acabarían extendiéndose por todo el planeta con efectos impredecibles.

La sucesiva aparición de variantes genéticas, con su distinto grado de patogenicidad y de transmisibilidad por un lado y el comportamiento de las personas por otro, han determinado la aparición de las distintas oleadas a las que hemos hecho referencia. La mayoría se pueden asociar a nuevas variantes, aunque en otros casos es el comportamiento humano ante periodos festivos, como es el caso de la Navidad, lo que las han propiciado. Este comportamiento mutable del virus nos ha hecho asistir a una prueba en vivo de la evolución biológica, donde la tecnología actual ha permitido secuenciar y comparar los genomas de un número muy elevado de virus llegando a trazar su distribución por el mundo. De este modo, hemos podido ver cómo las primeras oleadas estaban causadas por cepas genéticas aún relacionadas con las originales de China, mientras que la aparición posterior de otras, como delta u ómicron, han sido responsables de otras.

Alcalá la Real ha experimentado, hasta la fecha en la que se cierra este estudio, las seis oleadas descritas para el resto de la población española. Sin embargo, comparativamente, su importancia ha mostrado diferencias. Es una situación normal que incluso se ha dado en otras pandemias previas. En el caso de la gripe del 1918-19 hubo tres olas, una en primavera, otra en otoño y una tercera en el invierno de 1919. Aunque en la mayoría

de las poblaciones el brote más importante fue el de octubre-noviembre de 1918, no fue así en todas. Otro ejemplo lo podemos ver en el cólera, donde los distintos episodios epidémicos no tuvieron la misma importancia incluso en los distintos núcleos de población de Alcalá. Son varios los factores que pueden incidir en estas diferencias, como son el comportamiento de la población frente a la enfermedad o el hecho de que la incidencia de una oleada influya sobre la siguiente; un elevado impacto puede retirar de la población a individuos sensibles por el fallecimiento e inmunizar al resto haciendo que una oleada posterior tenga menos personas susceptibles, o al revés; en el caso de que una ola no afecte a un gran número de personas deja un mayor número de personas susceptibles para la siguiente. Probablemente estas circunstancias expliquen en Alcalá la Real esas diferencias a las que se ha hecho antes y que se puede observar en la figura 3, en la que se compara la tasa a 15 días en distintas poblaciones. Llegar a conclusiones más precisas en este sentido requeriría un estudio más profundo para el que probablemente no se disponga de información.

Otro aspecto importante que se puede observar en Alcalá la Real es cómo las últimas olas de la pandemia se han caracterizado por una reducción importante de la letalidad de la misma, entendiendo como tal la proporción de fallecidos en relación a los contagiados. Haciendo un análisis somero de los datos se puede ver cómo las tres primeras olas muestran una letalidad superior al 2%, llegando hasta un 2,7% en la tercera oleada, se reduce algo en la cuarta y en las dos últimas no supera el 0,5% (en la quinta no hay fallecidos). En esta reducción de la letalidad un elemento fundamental ha sido la vacunación, a la que se ha hecho referencia en los apartados anteriores. Aunque la protección frente al coronavirus no ha sido total, sí que se puede apreciar este descenso importante en la mortalidad como consecuencia de que la mayor parte de la población tiene la pauta de vacunación correctamente administrada. En este sentido es necesario señalar el hito científico que ha sido preparar una vacuna en tan corto tiempo como el hito que también ha sido inmunizar a casi toda la población en un plazo realmente breve. Otro factor ha sido la evolución más frecuente de los parásitos -en este caso el coronavirus- la cual tiende hacia formas más transmisibles pero menos letales, como así se puede ver comparando variantes como delta u ómicron.

A pesar de que los efectos de la pandemia se hayan atenuado y vivamos una situación de aparente normalidad, no debemos descuidarnos. Aunque veamos que la covid-19 tiende cada vez más a parecerse a una gripe estacional, no olvidemos que incluso esta enfermedad puede causar daños importantes en personas sensibles. Debemos mantener nuestras precauciones al menos en situaciones en las que el riesgo de contagio sea elevado. Debemos aprender de lo que hemos vivido durante estos dos años, como también debemos aprender de la historia. La pandemia de gripe de 1918 quedaba muy lejana y la covid-19 la ha puesto de actualidad y nos ha hecho ver los paralelismos entre estos acontecimientos. Y todo ello nos ha puesto de manifiesto que la próxima pandemia será cuestión de tiempo, y probablemente no mucho si seguimos alterando el medio ambiente. Esperemos haber aprendido lo suficiente para, si no podemos evitarla, si afrontarla de la manera más segura posible.

Para un estudio más detallado de la evolución de la COVID-19 en nuestro municipio remitimos a nuestro blog <https://epidemiasalcalalareal.blogspot.com/>, que iniciamos en diciembre de 2020. Desde entonces hemos publicado 78 entradas, que han recibido más de 12 800 visitas. La mayoría, con los datos semanales en nuestro municipio, pero también otras relacionadas con el coronavirus, epidemias varias, vacunas, organismos sanitarios y entrevistas. Estas últimas, un total de siete, se han realizado a Agustín Callejas, enfermero del Centro de Salud de Alcalá la Real; a Marino Aguilera, alcalde; a Manuel, Domingo, Pepe y Juan Manuel, directores de los centros de Educación Secundaria alcalaínos; y a Miguel Ángel Bueno, epidemiólogo del Distrito Sanitario de Jaén/Jaén Sur.

MESES	NUEVOS CASOS	TOTAL CASOS	NUEVAS DEFUNC.	TOTAL DEFUNC.
Marzo, 2020	20?	20?	5	5
Abril, 2020	22	42	6	11
Mayo, 2020	7	49	0	11
Junio, 2020	-1	48	0	11
Julio, 2020	4	52	0	11
Agosto, 2020	11	63	0	11
Septbre, 2020	47	110	0	11
Octbre, 2020	313	423	4	15
Novbre, 2020	398	821	10	25
Dicbre, 2020	58	879	6	31
Total, 2020	879	879	31	31
Enero, 2021	130	1009	5	36
Febrero, 2021	201	1210	6	42
Marzo, 2021	135	1345	4	46
Abril, 2021	397	1742	5	51
Mayo, 2021	69	1811	2	53
Junio, 2021	44	1855	0	53
Julio, 2021	217	2072	0	53
Agosto, 2021	230	2302	0	53
Septbre, 2021	17	2319	0	53
Octbre, 2021	5	2324	0	53
Novbre, 2021	9	2333	0	53
Dicbre, 2021	276	2609	1	54
Total, 2021	1730	2609	23	54
Enero, 2022	865	3474	1	55
Febrero, 2022	213	3687	4	59
Marzo (hasta día 25-03)	123	3810	2	61
Total, 2022 (hasta 25-03 incluido)	1201	3810	7	61
Total pandemia (hasta 25-03-2022)	3810	3810	61	61

Registro mensual y acumulado de contagios y defunciones.

Química farmacéutica: contexto histórico y actual del proceso de obtención de un fármaco

José Manuel Espejo Román^{a,b,c}

^a Departamento de Química Farmacéutica y Orgánica, Facultad de Farmacia, Universidad de Granada. C/Campus de Cartuja s/n, 18071 Granada (España).

^b Pfizer-Universidad de Granada-Junta de Andalucía-Centro de Genómica e Investigación Oncológica (Centro GENYO). P.T. Ciencias de la Salud, Avda. de la Ilustración 114, 18016 Granada (España).

^c Graduado en Farmacia por la Universidad de Granada, Máster Oficial Universitario de Investigación, Desarrollo, Control e Innovación de Medicamentos por la Universidad de Granada e investigador predoctoral dentro del programa de Doctorado en Farmacia por la Universidad de Granada.

1. Introducción: Concepto de la Química Farmacéutica

La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), en 1996, definió la Química Farmacéutica como:

“La Química Farmacéutica es una disciplina basada en la Química que involucra también aspectos de las ciencias biológicas, farmacéutica y médica. Su objetivo es la **invención, descubrimiento, diseño, identificación y preparación de compuestos biológicamente activos**, el estudio de su **metabolismo**, la interpretación de su **modo de acción** a nivel molecular y el establecimiento de las **relaciones estructura actividad**”¹.

En definitiva, esta disciplina se dedica al diseño, síntesis y análisis de fármacos. Se fundamenta en la relación que existe entre la estructura de un compuesto y la actividad que produce, teniendo como objetivo final el diseño de fármacos.

2. Historia de la Química Farmacéutica: de la droga al fármaco

Los medicamentos pueden ser considerados como uno de los descubrimientos más importantes del siglo XX ya que la vida del hombre se encuentra en mayor o menor medida, vinculada con estos productos desde su nacimiento hasta su muerte. El arsenal terapéutico del que actualmente dispone la humanidad se ha obtenido a partir de un número pequeño de prototipos que en Química Farmacéutica se denominan *cabezas de serie*. En la búsqueda o diseño de estos prototipos, así como en sus modificaciones que permiten llegar a compuestos más eficaces y seguros, se encuentra la finalidad de la Química Farmacéutica^{1,2}.

Los remedios curativos son tan antiguos como la propia humanidad. Hasta finales del siglo XIX todos los medicamentos procedían de la naturaleza (Figura 1), pero con el desarrollo de la Química Orgánica, se fueron separando de las drogas conocidas hasta entonces, las sustancias químicas contenidas en ellas y que eran las responsables de su acción, naciendo así el concepto de **principio activo**. Una vez conocida su estructura química, se trató de imitarla mediante síntesis, lo que suponía también la obtención de productos relacionados. De este modo se generaba la moderna Farmacología³.



Figura 1. En la antigüedad los primeros medicamentos se obtenían de la naturaleza, estos productos naturales se usaban como terapia para males y enfermedades. Imágenes obtenidas de <https://800noticias.com/guaros-obligados-a-usar-yerbas-para-curar-la-escabiosis> y <https://www.crushpixel.com/es/stock-photo/ancient-herbal-medicines-789142.html>.

Se diferencian tres etapas en la historia de la Química Farmacéutica:

- **Etapa Precientífica:** Hasta el siglo XIX, caracterizada por un uso empírico de las drogas.
- **Etapa Científica:** Comienza a principios del siglo XIX y termina hacia 1930, en ella se adapta el método científico para aislar y purificar productos naturales, producir productos sintéticos, determinar sus propiedades fisiológicas, etc.
- **Etapa actual:** Conocida como la Edad de Oro del descubrimiento de fármacos, se inicia aproximadamente en 1935-140.

2.1. Etapa Precientífica

El hombre históricamente hablando ha investigado la naturaleza para saciar sus dos necesidades principales: alimentos para combatir el hambre y proporcionarle nutrientes para su desarrollo y crecimiento y hierbas para mitigar el dolor y el sufrimiento. Las civilizaciones antiguas (Egipto, India, China) tenían verdaderos compendios en los que las hierbas eran la base para el tratamiento de enfermedades². Uno de estos compendios es el *Ayurveda* de 6000 años a. C., un amplio tratado con multitud de hierbas y que ha sido ampliamente utilizado en la India. Incluso hoy en día esta práctica supone un porcentaje importante de los tratamientos de este país⁴.

Uno de los compendios médicos más importante del antiguo Egipto fue el papiro de *Ebers* (1500 años a. C.), que contiene unas 700 preparaciones medicinales con detalles

de su composición y administración al paciente. La medicina egipcia desempeñó gran influencia sobre el pueblo griego, sin embargo, los griegos estaban fascinados por los efectos venenosos de las drogas, por la Toxicología. Platón en una de sus obras narra el suicidio de Sócrates por ingestión de zumo de frutas conteniendo opio y cicuta. Las propiedades terapéuticas y tóxicas de las hierbas se fueron conociendo poco a poco a través de aproximaciones empíricas. Otro ejemplo significativo, fue cuando los soldados hambrientos de Marco Aurelio, murieron por ingerir raíces de acónito, que contiene aconitina que es un compuesto muy tóxico^{2,4}.

El naturalista romano Galeno (siglo II d. C.) establece las bases técnicas para la preparación de las primeras formas farmacéuticas a partir de productos de origen vegetal a las que les llamó preparaciones galénicas. Por otro lado, el naturalista Dioscórides (siglo II d. C.) describe en su obra diferentes formulaciones preparadas con materiales de los tres grandes reinos y además puso en uso algunas de las operaciones químicas utilizadas hoy en día: sublimación, destilación o cristalización.

En el siglo XVI, Paracelso comenzó propiamente la Química Farmacéutica y el empleo de sales minerales en terapias. Además, generalizó el uso del opio en Europa en una tintura alcohólica, el laúdano, para reducir todo tipo de dolor. También, en esta época se empezaron a utilizar las farmacopeas, libros recopilatorios de recetas de productos con propiedades medicinales, en los que se incluían los elementos por los que están constituidos y además el modo de preparación y de uso de los mismos. En el siglo XVII, la conquista de América supone la incorporación de nuevos tratamientos como la quina, ipecacuana, zarzaparrilla, resinas, etc, así como la publicación de textos donde se describe la acción y el uso de estas nuevas drogas por las culturas precolombinas. En el siglo XVIII, se utilizaba la droga digital que todavía se usa en el fallo cardíaco congestivo. Y en el año 1796, el médico inglés Jenner descubrió la primera vacuna de la viruela^{4,5}.

2.2. Etapa Científica

A principios del siglo XIX, se comenzó a extraer las sustancias puras de las plantas. La mayoría de ellas eran muy tóxicas, aunque algunas como la morfina o la cocaína se prescribieron abundantemente. Al final del siglo XIX, el farmacólogo Buchheim definió la misión de la farmacología: “aislar la sustancia activa de la droga, encontrar las propiedades químicas responsables de la acción farmacológica y buscar drogas sintéticas más activas”. Actualmente estas funciones las hacen distintos científicos. El objetivo es localizar el *cabeza de serie o prototipo* de una determinada actividad, que es el compuesto con mejores propiedades. Normalmente será necesario modificar los compuestos para llegar al *cabeza de serie*¹.

Al final del siglo XIX, empezaron a aparecer los primeros fármacos sintéticos, fundamentalmente motivados por la necesidad de encontrar compuestos con menos toxicidad. La estrategia consistía en buscar estructuras relacionadas con los compuestos activos que se conocían. El inmunólogo Paul Ehrlich fue una figura importante de esta época. Se le

considera el padre de la Quimioterapia, que él define como el empleo de fármacos que dañan al organismo invasor sin causar daño al huésped. También postuló la existencia de receptores en las células, teoría que posteriormente se desarrolló en el concepto de antígeno-anticuerpo. Ehrlich fue el primero en plantear que para determinar si un compuesto es útil, se deben evaluar la actividad biológica y la toxicidad.

Posteriormente, John Langley planteó una teoría sobre un nuevo concepto de **receptor**, que es una proteína que puede aceptar compuestos y provocar una respuesta biológica. Pueden aceptar **compuestos estimulantes**, que provocaría una respuesta biológica, o **compuestos no estimulantes**, que prevendría la respuesta. Esta teoría, a día de hoy es un concepto fundamental en la Química Farmacéutica^{4,5}.

Paul Ehrlich y Sacachiro Hata realizaron el **primer desarrollo racional de un fármaco sintético** en 1910, la Arsphenamina. Para su obtención combinaron **síntesis** y procesos de **evaluación biológica**⁵.

2.3. Etapa Actual

A principios del siglo XX aparece la Química Farmacéutica. Se desarrolla rápidamente al haber tantos químicos trabajando en este campo. Del estudio que Ehrlich realizaba de la relación entre toxicidad y actividad, surgió el término **relación estructura-actividad (SAR)**. Una vez que se conocen los receptores y el mecanismo de acción del compuesto es lógico pensar en una relación entre la estructura química y su actividad biológica.

En la segunda mitad del siglo XX, se produce un gran avance en el conocimiento de las alteraciones química y bioquímica que provoca cada enfermedad, lo que facilitó la función de los químicos farmacéuticos. Posteriormente en 1960 Hansch y Fujita idearon un método para incorporar medidas cuantitativas en la determinación de la relación estructura-actividad. La técnica se llama **relación cuantitativa estructura-actividad (QSAR)**.

Gracias a la biología molecular es posible disponer de cantidades significativas de moléculas receptoriales suficientemente puras. Además, en ocasiones estas moléculas se pueden cristalizar permitiendo determinar su estructura tridimensional mediante técnicas de **crystalografía de rayos X**.

En la actualidad, con la ayuda de ordenadores muy potentes y de programas informáticos muy desarrollados y depurados se pueden llevar a cabo procesos de **modelización molecular** que nos permiten predecir moléculas en tres dimensiones y diseñar racionalmente fármacos para receptores específicos^{6,7}.

3. Búsqueda de cabezas de serie o prototipos

La introducción en el mercado de un nuevo fármaco y su transformación en un medicamento, precisa de varias etapas que se pueden resumir en: (i) búsqueda del modelo, (ii)

manipulación del modelo y (iii) determinación de formas farmacéuticas y dosificación. La búsqueda del modelo o *cabeza de serie* supone encontrar una nueva actividad biológica en una molécula química. Se trata de estudiar nuevas estructuras que puedan servir como punto de partida para su posterior modificación estructural. En la etapa de manipulación del modelo, se pretende modificar el cabeza de serie para poder obtener estructuras con mejor actividad¹.

3.1. Descubrimiento tradicional de un prototipo o cabeza de serie

El descubrimiento de un nuevo *cabeza de serie* puede realizarse de distintas formas, históricamente las estructuras más interesantes se han encontrado como consecuencia del estudio de:

a) De la actividad biológica en productos del metabolismo secundario de organismos vivos, plantas, animales o microorganismos

- A partir de plantas:

Algunos de los ejemplos más relevantes, la **morfina** y la **codeína** (analgésicos) se aislaron del opio (extracción de *Papaver somniferum*, planta conocida como adormidera). La **cafeína**, el estimulante más conocido, se obtiene de las semillas del café. El antipalúdico **quinina** que se obtiene de la corteza de quina y a partir del mismo se descubrió otro antipalúdico muy conocido, la **cloroquina**. También destaca la **atropina**, un alcaloide que se obtiene de *Atropa belladona* y que se utiliza para la relajación de los músculos bronquiales, entre otras muchas acciones^{3,5} (Figura 2).

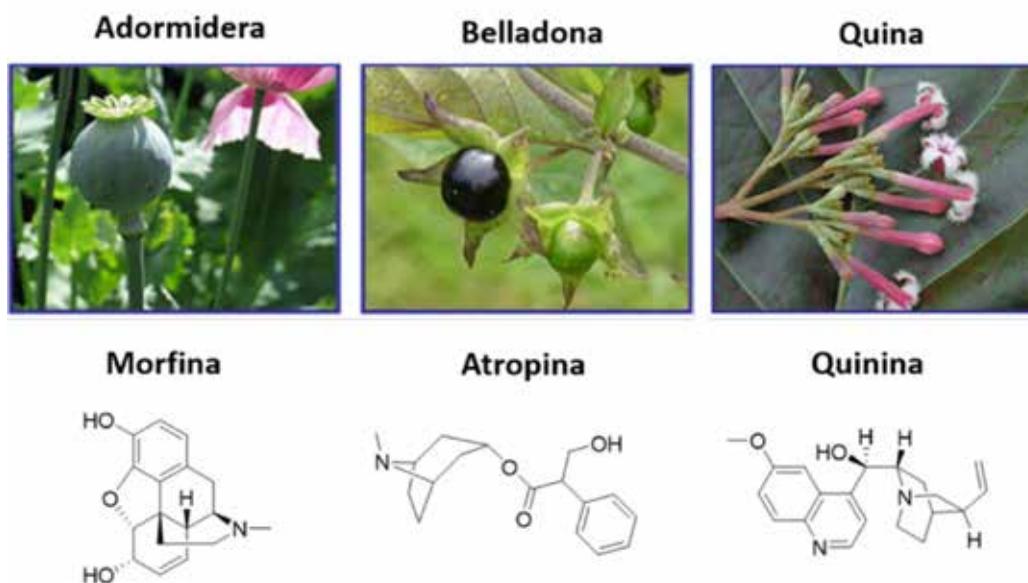


Figura 2. Imágenes de las plantas de adormidera (*Papaver somniferum*), belladonna (*Atropa belladonna*) y quina (*Cinchona pubescens*). A partir de las mismas, se pueden aislar y obtener respectivamente las moléculas de morfina, atropina y quinina. Imágenes obtenidas de <https://es.wikipedia.org>. Estructuras químicas creadas con el software ChemDraw 20.0.

- A partir de animales:

La **adrenalina**, inicialmente usada como vasoconstrictor, permitió la preparación de la **isoprenalina**, que actualmente se usa para el tratamiento de la bradicardia, el bloqueo cardiaco y el asma. Otros ejemplos destacables, son la **vitamina D** (aislada del aceite de hígado de bacalao) con propiedades antirraquíticas o la **vitamina K** (obtenida de la alfalfa) que es esencial para la coagulación³.

- A partir de microorganismos:

La **penicilina** y las **cefalosporinas** se aislaron de hongos y son antibióticos muy conocidos y usados hoy en día en la terapéutica antimicrobiana. A partir de la modificación estructural de estos metabolitos se han obtenido derivados sintéticos o semisintéticos con mejor acción terapéutica³.

b) Del descubrimiento accidental de una actividad biológica en compuestos sintéticos

El **nitrilo de pentilo** fue un compuesto afrodisiaco que producía fuertes dolores de cabeza, se observó que este efecto era consecuencia de la bajada de la presión arterial que daba lugar a la persona que lo consumía. A partir de ese momento, se han estudiado y empleado los nitritos como fármacos vasodilatadores. Otro ejemplo, fue el **óxido nítrico o gas de la risa** que se probó en personas con la intención de curar enfermedades y se comprobó que tenía propiedades anestésicas. También en 1935, el botánico Erdtman descubrió el efecto de adormecimiento en la lengua que producía la isogramina, un compuesto que tuvo que sintetizar en sus investigaciones. A partir de los estudios de síntesis de análogos de la isogramina, se preparó la **lidocaína** que resultó ser un excelente anestésico local^{4,5}.

c) Del descubrimiento de efectos inesperados en la aplicación terapéutica de fármacos conocidos

En este grupo hay que destacar el **ácido salicílico**, que fue autorizado como antiséptico para uso externo en 1879. Más adelante se observó que reducía la fiebre de los pacientes, lo que permitió ensayarlo para controlar las fiebres reumáticas. Otro ejemplo reseñable es el caso de las **sulfamidas**, los primeros antibióticos sistémicos eficaces. A partir de las mismas, surgieron los fármacos diuréticos, como por ejemplo la acetazolamida que permite disminuir la presión arterial⁵.

d) Estrategias basadas en planteamientos bioquímicos

El fármaco antitumoral **5-fluorouracilo** (análogo del uracilo, componente básico del ARN) inhibe la enzima timidilato sintetasa, una proteína esencial en la formación de un metabolito necesario para la correcta síntesis y reparación del ADN. Otro ejemplo, es el

efecto antimicrobiano de las **sulfonamidas**. Estas moléculas tienen una estructura similar a un metabolito necesario para la supervivencia de los microorganismos. Al ser similares estructuralmente, los microorganismos se creen que su metabolito son las sulfonamidas y por tanto mueren⁵.

3.2. Descubrimiento de un prototipo o *cabeza de serie* en la actualidad

Los enfoques históricos hasta ahora descritos son válidos en la actualidad, pero hay que tener en cuenta las nuevas tecnologías que están permitiendo abrir nuevas posibilidades en el descubrimiento de fármacos más seguros y eficaces.

Como hemos mencionado anteriormente el desarrollo de las ciencias bioquímicas en el ámbito de la purificación de proteínas permite el estudio entre los sistemas enzimáticos y los fármacos. Además, los estudios SAR y QSAR permiten establecer relaciones entre la estructura de las moléculas y su actividad biológica. Por ejemplo, una vez que obtenemos la ecuación adecuada para nuestro **cabeza de serie** podemos predecir que efecto tendremos al introducir diferentes sustituyentes en los que varía cualquiera de las propiedades biológicas con la finalidad de obtener más fármacos activos. A partir de estudios de este tipo se obtuvo el fármaco **norfloxacino**, un antibiótico que actualmente se usa en el tratamiento de infecciones urinarias. Por otro lado, los estudios de resonancia magnética nuclear y la cristalografía mediante rayos X proporcionan poder conocer cómo se disponen espacialmente las proteínas, lo que hace que sean herramientas de gran importancia en el actual proceso de descubrimiento de fármacos.

En definitiva, las técnicas computacionales, las espectroscópicas, la cristalografía, los cálculos físico-químicos y los programas estadísticos han permitido que hoy día podamos ver la relación fármaco-receptor como algo medible, visible y optimizable^{6,7} (Figura 3).

En la actualidad existen técnicas de ensayos biológicos robotizados, que permiten realizar un gran número de los mismos en el menor tiempo posible con la finalidad de seleccionar los mejores compuestos de una serie y así optimizar el proceso de obtención de fármacos, esto se conoce como cribado o screening. Podemos destacar varios tipos de cribado:

a) Cribado exhaustivo:

Se lleva a cabo sobre un número relativamente reducido de moléculas y se someten a una amplia batería de ensayos bioquímicos o farmacológicos con el fin de estudiar el mayor número posible de propiedades biológicas. A partir de esta técnica, surgieron las **benzodiacepinas** como ansiolíticos.

b) Cribado aleatorio:

En esta ocasión, la búsqueda se dirige hacia una determinada actividad biológica y se evalúa una gran diversidad de compuestos, tanto de origen natural como sintético, gene-

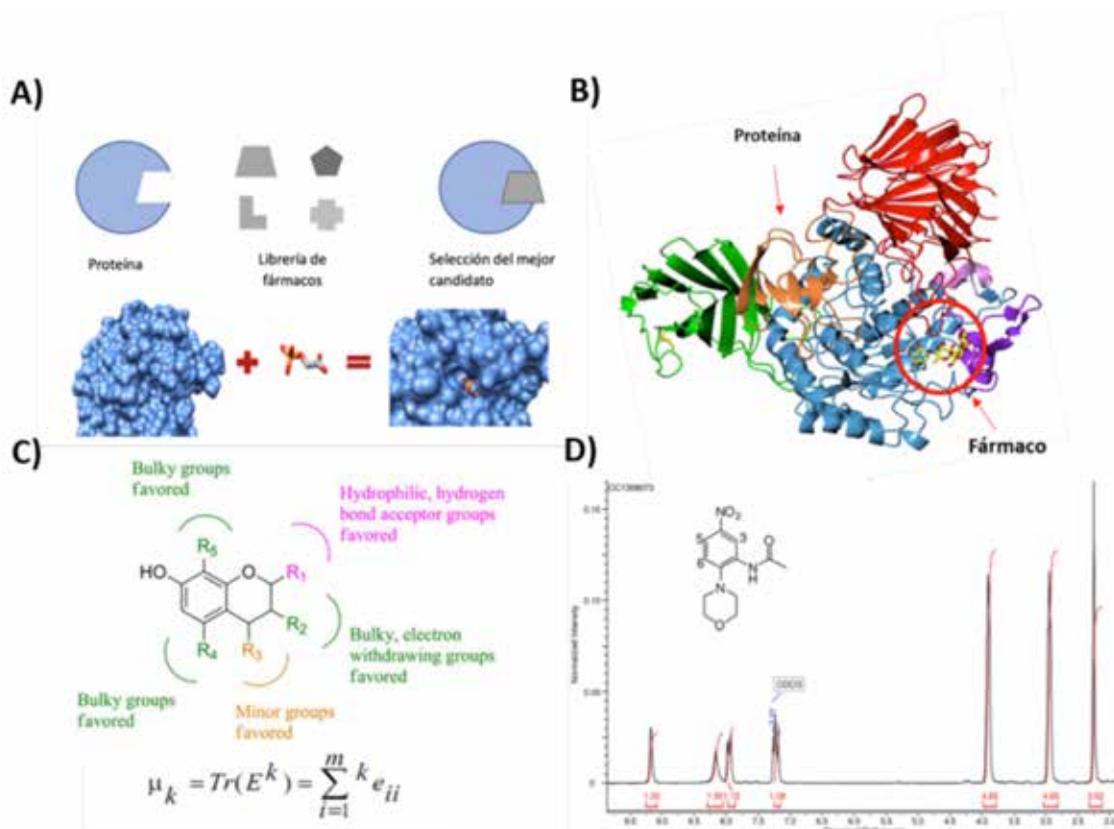


Figura 3. Algunas de las principales técnicas usadas en el actual desarrollo de fármacos. A) Mediante química computacional podemos determinar que fármacos y que disposición en el espacio son mejores para interactuar con una proteína específica. B) La cristalografía de rayos X nos permite determinar la estructura tridimensional de las proteínas lo que nos posibilita estudiar dónde y de qué manera puede interactuar un fármaco. C) Los análisis SAR y QSAR nos permiten relacionar la estructura de las moléculas con su actividad biológica con el objetivo de optimizar y diseñar compuestos más seguros y potentes. D) El análisis espectroscópico (resonancia magnética nuclear) de los compuestos y sus receptores nos permite caracterizar las estructuras y estudiar las interacciones entre los mismos.

Adaptación de https://en-lifesci.tau.ac.il/bioinformatics-unit/Autodock_2016.

ralmente ya conocidos e incluso con otras actividades terapéuticas no relacionadas con las propiedades biológicas en estudio. Un ejemplo de descubrimiento a partir de cribado aleatorio fue el **taxol**, un fármaco antitumoral de origen natural extraído de *Taxus brevifolia*.

c) Cribado combinado:

Se llevan a cabo diversos ensayos biológicos de una gran variedad de moléculas de forma simultánea. Estos procesos requieren técnicas de robotización que son usuales en las grandes compañías farmacéuticas, en inglés denominado “high throughput screening”, HTS. Se han desarrollado sistemas de 96, 384 o 1536 reactores que permiten cribados de 300.000 a 400.000 muestras en un periodo de 5-7 meses. Un ejemplo de fármaco descubierta a partir de este cribado de alto rendimiento ha sido la **lovastatina**, fármaco indicado en la disminución del colesterol y prevención de enfermedades cardiovasculares^{5,6} (Figura 4).



Figura 4. Ilustraciones de un robot de pipeteo realizando ensayos biológicos en placas de 96 pocillos para la determinación de la acción terapéutica de una familia de compuestos químicos. Adaptación de <https://www.directindustry.es/prod/ibs-integra-biosciences/product-39224-1985238.html>.

4. Etapas del desarrollo de un fármaco

a) Investigación básica:

Se realiza la **identificación** o búsqueda del **prototipo** previa elección de la diana terapéutica. Tras este paso se procede a determinar la afinidad, eficacia y potencia mediante ensayos biológicos *in vitro* (células, enzimas, receptores, tejidos) e *in vivo* (animales, plantas). Una vez obtenida la relación estructura-actividad del prototipo se procede a su optimización con el objetivo de desarrollar moléculas que presenten mejores interacciones con la diana terapéutica permitiendo actividades farmacológicas más potentes y menor toxicidad. En la etapa de **optimización**, siempre que sea posible se intenta obtener compuestos más simples que mantengan o mejoren la actividad del prototipo, de esta manera el proceso sintético se simplifica produciendo un ahorro de tiempo y dinero.

b) Desarrollo preclínico:

Se llevan a cabo ensayos relacionados con la producción como el análisis de impurezas o el control microbiológico, estudios relacionados con propiedades fisico-químicas como la estabilidad o solubilidad y estudios galénicos. En esta etapa se incluyen investigaciones para determinar el **perfil farmacológico** (dosis mínimas de fármaco para obtener el efecto terapéutico, interacciones con otros fármacos), **toxicológico** (determinación de dosis seguras de administración) y **farmacocinético** del fármaco (etapas de absorción, distribución, metabolismo y excreción de un fármaco en el organismo humano). Durante el desarrollo preclínico se debe proporcionar un método eficiente para su producción en gran escala. También, en esta fase se realizan estudios *in vitro* para analizar los efectos sobre sistemas acelulares (preparaciones enzimáticas purificadas) y los efectos sobre células humanas o animales en cultivo.

c) Desarrollo clínico:

Consta de cuatro fases y se caracterizan por ser ensayos que se realizan en pacientes humanos:

- **Fase I:** Sin abandonar los estudios preclínicos, se determina la tolerancia y la seguridad en voluntarios sanos a partir de la realización de estudios farmacocinéticos y farmacodinámicos.
- **Fase II:** Una vez que se ha superado satisfactoriamente la fase I, se realizan los estudios en pacientes que padecen la enfermedad para estudiar la relación dosis-respuesta. Se determina la dosis a administrar y los métodos de distribución (oral, intravenosa, intramuscular...).
- **Fase III:** En esta etapa se confirma a gran escala la eficacia y seguridad de un fármaco intentando reproducir las condiciones habituales de administración del mismo. Se realiza la comparación con tratamientos ya disponibles para la enfermedad a tratar. Después de esta fase, la compañía farmacéutica puede solicitar la aprobación del fármaco para su comercialización (este periodo suele durar entre 7 y 15 años).
- **Fase IV:** Evaluación de los efectos a largo plazo del medicamento (estudios post-comercialización). En esta fase, se incluyen todos los ensayos que se desarrollan tras la comercialización del fármaco como nuevas aplicaciones^{8,9}.



Figura 5. Esquema ilustrativo de las etapas del desarrollo de un nuevo fármaco con la duración aproximada de cada una de ellas. Adaptación de http://phrma-docs.phrma.org/sites/default/files/pdf/2015_phrma_profile.pdf.

Coste de un fármaco:

A modo curiosidad el coste medio que conlleva sacar un nuevo medicamento al mercado es de unos 1.000 millones de euros y supone alrededor de 20 años de investigación donde más de la mitad de este tiempo transcurre en los ensayos clínicos. Por cada fármaco que recibe el permiso de la agencia reguladora para que se pueda comercializar, se analizan más de 10.000 moléculas. Si el fármaco llega a la fase clínica, tiene un 21,5 % de posibilidades de ser aprobado¹ (Figura 5).

5. Perspectivas de futuro

El proceso de descubrimiento de fármacos se encuentra en una constante evolución gracias a la implantación de nuevas metodologías y tecnologías en el campo de la biología molecular y estructural, la genómica, la farmacología, la informática y la química farmacéutica que permiten obtener nuevos prototipos en menos tiempo y con más probabilidad de éxito.

Los avances logrados por la innovación farmacéutica en las últimas décadas se centran en el descubrimiento de nuevos fármacos para que el paciente pueda vivir cada vez más y en mejores condiciones de salud. Se espera que en los próximos años, enfermedades que se consideran hoy en día incurables o raras, tengan un tratamiento gracias a los esperanzadores avances científicos.

6. Bibliografía

1. Avendaño López M. 2010. Introducción a la química farmacéutica. Madrid: McGraw-Hill.
2. Drews J. Drug Discovery: A Historical Perspective. *Science*. 2000;287(5460):1960-1964.
3. Chin Y, Balunas M, Chai H, Kinghorn A. Drug discovery from natural sources. *The AAPS Journal*. 2006;8(2):E239-E253.
4. Patrick G. 2013. An introduction to medicinal chemistry. Oxford: Oxford University Press.
5. Delgado Cirilo A, Minguillón Llombart C, Joglar Tamargo J. 2003. Introducción a la química terapéutica. Barcelona: Díaz de Santos.
6. Hughes J, Rees S, Kalindjian S, Philpott K. Principles of early drug discovery. *British Journal of Pharmacology*. 2011;162(6):1239-1249.
7. Sliwoski G, Kothiwale S, Meiler J, Lowe E. Computational Methods in Drug Discovery. *Pharmacological Reviews*. 2013;66(1):334-395.
8. Phases of Drug Development Process, Drug Discovery Process. NorthEast BioLab. 2022 [cited 16 January 2022]. Available from: <https://www.nebiolab.com/drug-discovery-and-development-process/>.
9. Flórez, J., Armijo, J. and Mediavilla, A. 2014. Farmacología humana. Ámsterdam: Elsevier Masson.

Covid-19 y afección de los derechos fundamentales

Sandra Mesa Pérez

Jueza en prácticas

Nuestra Constitución recoge una lista de derechos fundamentales que tan sólo pueden ser objeto de suspensión o limitación general cuando se declara el estado de alarma, excepción o sitio. El derecho de excepción en España viene recogido en los artículos 55.1 y 116 de la Constitución Española (en adelante CE) y en la Ley Orgánica 4/1981 de 1 de junio, de los estados de alarma, excepción y sitio (en adelante LOEAES).

-El Estado de alarma está concebido como instrumento de reacción frente a catástrofes naturales, crisis sanitarias, paralización de servicios públicos esenciales o desabastecimiento de productos de primera necesidad (art. 4.1 LOEAES).

-El Estado de excepción está previsto para responder a situaciones de grave alteración del orden público (art. 13.1 LOEAES).

-El Estado de sitio está previsto para los supuesto más extremos en los que se ve amenazada la propia existencia del Estado como podría ser el caso de una insurrección o un acto de fuerza contra la soberanía del Estado (art. 32.1 LOEAES).

Ahora bien, cada uno de estos Estados supone una afección distinta a los derechos fundamentales, que va desde una afectación mínima con el estado de alarma a una afectación máxima con el estado de excepción. En el estado de alarma pueden limitarse derechos, pero no suspenderse, mientras que en el Estado de excepción y sitio sí pueden suspenderse derechos¹.

En los Estados de alarma y excepción se pueden limitar o suspender derechos, pero no todos, solo se pueden restringir los siguientes²:

-Derecho a la libertad y seguridad personal (art. 17 CE): esto significa que el periodo de detención de una persona sin ser puesta a disposición judicial puede extenderse de 72 horas a 10 días (art. 16 LOEAES).

-Derecho a la inviolabilidad del domicilio (art. 18.2 CE): esto significa que se pueden llevar a cabo entradas y registros domiciliarios sin autorización judicial (art. 17 LOEAES).

¹ Vid. STC 83/2016, de 28 de abril que en su fundamento jurídico 8 dispone: “A diferencia de los estados de excepción y de sitio, la declaración del estado de alarma no permite la suspensión de ningún derecho fundamental (art. 55.1 CE contrario sensu), aunque sí la adopción de medidas que pueden suponer limitaciones o restricciones a su ejercicio”.

² Vid. Carmona Cuenca, E (2021), “Estado de alarma, pandemia y derechos fundamentales. ¿Limitación o suspensión?”, *Revista de Derecho Político Uned*. Núm. 112, septiembre-diciembre 2021, pp. 13-42.

- Derecho al secreto de las comunicaciones (art. 18.3 CE): esto significa que la autoridad gubernativa podrá intervenir toda clase de comunicaciones sin autorización judicial (art. 18 LOEAES).
- Libertad de residencia y circulación (art. 19 CE): esto implica la prohibición de circulación, sometimiento de ésta a condiciones temporales o geográficas, comunicación previa de desplazamiento a la autoridad gubernativa y posibilidad de obligar a ciertos desplazamientos, entre otras medidas (art. 20 LOEAES).
- Libertad de expresión e información (art. 20.1 a) y d) y 20.5 CE): implica que la autoridad gubernativa puede suspender emisiones o acordar el secuestro de publicaciones, pero en ningún caso puede acordar la censura previa (art. 21 LOEAES).
- Derecho de reunión y manifestación (art. 21 CE): las reuniones pueden ser prohibidas, disueltas o sometidas a autorización previa salvo las orgánicas de partidos políticos y sindicatos y asociaciones empresariales que nunca pueden ser limitadas (art. 22 LOEAES).
- Derecho de huelga y conflicto colectivo (art. 28.2 y 37.2 CE): significa que puede prohibirse su ejercicio (art. 23 LOEAES).

Con respecto al derecho a la libertad de circulación, recogido en el art. 19 CE, la diferente afección de este derecho en un estado de alarma y en un estado de excepción viene señalada por el art. 11 LOEAES (para el estado de alarma) y por el art. 20 (para el estado de excepción).

Así, el art. 11 de la LOEAES dispone que las medidas que pueden adoptarse en el estado de alarma son las siguientes:

- a) **Limitar la circulación o permanencia de personas o vehículos en horas y lugares determinados, o condicionarlas al cumplimiento de ciertos requisitos.**
- b) *Practicar requisas temporales de todo tipo de bienes e imponer prestaciones personales obligatorias.*
- c) *Intervenir y ocupar transitoriamente industrias, fábricas, talleres, explotaciones o locales de cualquier naturaleza, con excepción de domicilios privados, dando cuenta de ello a los Ministerios interesados.*
- d) *Limitar o racionar el uso de servicios o el consumo de artículos de primera necesidad.*
- e) *Impartir las órdenes necesarias para asegurar el abastecimiento de los mercados y el funcionamiento de los servicios de los centros de producción afectados por el apartado d) del artículo cuarto.*

Por su parte, el artículo 20 de la LOEAES dispone, con respecto al estado de excepción, lo siguiente:

Uno. Cuando la autorización del Congreso comprenda la suspensión del artículo diecinueve de la Constitución, la autoridad gubernativa podrá prohibir la circulación de personas y vehículos en las horas y lugares que se determine, y exigir a quienes se desplacen de un lugar a otro que acrediten su identidad, señalándoles el itinerario a seguir.

Dos. Igualmente podrá delimitar zonas de protección o seguridad y dictar las condiciones de permanencia en las mismas y prohibir en lugares determinados la presencia de persona que puedan dificultar la acción de la fuerza pública.

Tres. Cuando ello resulte necesario, la Autoridad gubernativa podrá exigir a personas determinadas que comuniquen, con una antelación de dos días, todo desplazamiento fuera de la localidad en que tengan su residencia habitual.

Cuatro. Igualmente podrá disponer su desplazamiento fuera de dicha localidad cuando lo estime necesario.

Cinco. Podrá también fijar transitoriamente la residencia de personas determinadas en localidad o territorio adecuados a sus condiciones personales.

Seis. Corresponde a la Autoridad gubernativa proveer de los recursos necesarios para el cumplimiento de las medidas previstas en este artículo y, particularmente, de las referidas a viajes, alojamiento y manutención de la persona afectada.

Siete. Para acordar las medidas a que se refieren los apartados tres, cuatro y cinco de este artículo, la Autoridad gubernativa habrá de tener fundados motivos en razón a la peligrosidad que para el mantenimiento del orden público suponga la persona afectada por tales medidas.

Para finalizar este apartado conviene hacer mención al art.116 CE que prevé distintos requisitos para la declaración de cada uno de estos estados. Así, el estado de alarma puede ser declarado por el Gobierno sin autorización del Congreso de los Diputados, si bien se deberá dar inmediata cuenta al Congreso y se requerirá su autorización para prorrogar este estado más allá de 15 días. El estado de excepción se declara también por el Gobierno, pero previa autorización del Congreso de los Diputados, además la duración es de 30 días y puede ser prorrogado una sola vez más. El estado de sitio requiere la aprobación por mayoría absoluta del Congreso tras la propuesta del Gobierno. Por tanto, en el único caso en que el Gobierno puede declarar unilateralmente alguno de estos estados es en el caso del estado de alarma, para los demás estados necesitará el apoyo del Congreso.

2. Declaración del estado de alarma en España como consecuencia del Covid-19.

El Gobierno español declaró el estado de alarma como consecuencia de la crisis sanitaria ocasionada por la COVID-19 el 14 de marzo mediante la aprobación del Real Decreto 463/2020 (reformado parcialmente por el Real Decreto 465/2020, de 17 de marzo y prorrogado por Real Decreto 476/2020, de 27 de marzo). Este real decreto contemplaba limitaciones de derechos fundamentales como los siguientes:

-Libertad de circulación y de entrar o salir del territorio nacional del art. 19 CE: el art. 7 RD 463/2020 prohibía circular por las calles y espacios abiertos salvo por causas tasadas (trabajo, asistencia a personas dependientes, provisión de alimentos...). Muchos autores consideran que esta limitación no fue una limitación sino una suspensión del derecho a la libertad de circulación, pues la limitación significa que la regla general es el ejercicio del derecho y la excepción es la prohibición del derecho. Sin embargo, el art. 7 del RD parecía establecer como regla general la prohibición de circular y como excepción la libre circulación³.

- Derecho a la propiedad privada (art. 33 CE): el art. 8 RD463/2020 establecía la posibilidad de requisar temporalmente bienes.
- Derecho al trabajo (art. 35 CE): el art. 8 RD 463/2020 disponía que era posible imponer prestaciones personales obligatorias.
- Libertad de empresa (art. 38 CE): el art. 10 RD 463/2020 permitía la posibilidad de limitar actividades comerciales, culturales, recreativas, de hostelería etc.

Algunos autores consideran que con el RD 463/2020 se limitaron y suspendieron muchos más derechos de los que la LOEAES permite y estos son los siguientes:

- Derecho a la educación del art. 27 CE: el art. 9 del RD 463/2020 suspendió la actividad educativa presencial y estableció la modalidad *on-line* o a distancia, pero esto supuso una diferencia de trato entre estudiantes que contaban con medios informáticos y otros que no disponían de ellos⁴.
- Derecho a la tutela judicial efectiva (art. 24 CE): se suspendieron los plazos previstos en las leyes procesales salvo algunas excepciones.
- Derecho a la libertad religiosa (art. 16 CE): el art. 7 del Real Decreto, antes mencionado que prohibía desplazarse, no contemplaba como excepción la asistencia a lugares de culto o ceremonias religiosas, de hecho la Orden SND/298/2020, de 29 de marzo dictada por el Ministro de Sanidad prohibía los velatorios o celebraciones religiosas fúnebres, admitiendo tan sólo una ceremonia de despedida con tres familiares del difunto⁵.
- Derecho de reunión y manifestación (art. 21 CE): algunos autores piensan que aunque este derecho no estaba limitado expresamente en el RD 463/2020, en la práctica, las limitaciones del derecho a la libertad de circulación del art. 7 suponían una limitación del derecho de reunión y manifestación⁶. El TC tuvo ocasión de pronunciarse sobre la limitación de este derecho en su Auto de 30 de abril de 2020 en el que resolvió sobre la prohibición de una manifestación de vehículos que estaba convocada en Vigo. El TC consideró que la limitación del derecho de manifestación era proporcional a la situación de emergencia sanitaria que se estaba viviendo, pues la manifestación de vehículos podía suponer un colapso en el tráfico que impidiese el desplazamiento de los vehículos sanitarios. En este caso el Tribunal ponderó el derecho a la libertad de manifestación y el derecho a la vida y a la salud y resolvió a favor de estos últimos.

El Real Decreto 926/2020, de 25 de octubre prorrogó el estado de alarma hasta el 9 de mayo de 2021. La novedad que introduce este Real Decreto en lo referente a la limitación

³ Vid. Garrido López, C. (2020), “La naturaleza bifronte del Estado de alarma y el dilema limitación-suspensión de derechos”, *Teoría y Realidad Constitucional* Núm. 46, pp. 393-394.

⁴ Vid. Presno Linera, M. (2020), “Coronavirus SARS-Cov-2 y derechos fundamentales: El derecho a la educación” publicado el 6 de mayo de 2020 en: <https://presnolinera.wordpress.com/category/derechos-fundamentales/> (última fecha de consulta: 10 de mayo de 2022).

⁵ Vid. Carmona Cuenca, E (2021), “Estado de alarma, pandemia y derechos fundamentales. ¿Limitación o suspensión?”, *Revista de Derecho Político Uned*. Núm. 112, septiembre-diciembre 2021, pp. 13-42.

⁶ Vid. Presno Linera, M.A. (2021), “El derecho de reunión durante el estado de alarma sanitaria por Covid-19”, en Garrido López, C. (Coord.), *Excepcionalidad y Derecho: El estado de alarma en España*, Zaragoza, Fundación Manuel Giménez Abad, pp. 197-224.

de derechos fundamentales es el toque de queda. Este Real Decreto también limitaba la entrada y salida de los territorios de las Comunidades Autónomas (art. 6 RD 926/2020) y restringía el número de personas reunidas en grupo en espacios abiertos y privados (art. 7 RD 926/2020).

3. Constitucionalidad del estado de alarma.

Como consecuencia de la declaración del estado de alarma y las continuas restricciones de derechos fundamentales, la constitucionalidad de las medidas adoptadas por el Gobierno fueron muy debatidas. Concretamente, surgía la polémica sobre si el estado de alarma declarado por el Gobierno amparaba la gran afección de derechos fundamentales, o dicho de otro modo, si las medidas tan restrictivas adoptadas eran más propias de un estado de excepción que de un estado de alarma. La clave para resolver esta polémica era determinar si lo que estaba haciendo el Gobierno era suspender o limitar derechos fundamentales, pues como se ha expuesto más arriba el estado de alarma permite la limitación, pero no la suspensión de los derechos fundamentales.

Pedro Cruz Villalón definía el estado de alarma como un tercer estado a medio camino entre la normalidad y los estados de excepción y de sitio. Según este autor, en el estado de alarma es posible limitar el ejercicio de los derechos fundamentales, pero no suspenderlo. Ahora bien, estas limitaciones no podían afectar al contenido esencial de los derechos, pues eso equivalía a su suspensión⁷. Esta tesis es la mantenida por nuestro Tribunal Constitucional en su STC 83/2016 de 28 de abril. No obstante, por mucho que se produzca suspensión de derechos, estos no pueden desaparecer y no pueden quedar desprovistos de todas las garantías, pues siempre debe permanecer intacta la garantía del control judicial de la medida y además la propia LOEAES limita el alcance de las restricciones de los derechos fundamentales a supuestos tasados contemplados entre los arts. 13 a 36⁸.

El 14 de julio de 2021 el TC dictó la sentencia 148/2021, en esta sentencia declaró la inconstitucionalidad del art. 7.1 7.3 y 7.5 del RD 465/2020. Estos artículos regulaban el confinamiento y la prohibición de circulación por el territorio nacional, salvo que concurrieran las causas tasadas en el art. 7.1. El TC considera que este confinamiento supuso una suspensión del derecho a la libertad de circulación y no una mera limitación, por lo que las restricciones de derechos fueron más propias de un estado de excepción que las de un estado de alarma. Así, el TC considera que se suspendió el ejercicio del derecho, pues se prohibía circular por las vías de uso público como norma general y en casos excepcionales y para la realización de actividades primarias (compra de comida o medicamentos por ejemplo) se permitía salir del domicilio. Además, la salida debía realizarse individualmente, salvo que se acompañase a personas con discapacidad o por otra causa justificada. Según el TC esto suponía un condicionamiento del derecho a la libertad de circulación no sólo por sus fines sino también por sus circunstancias. Así, se prohibía con carácter

⁷ Vid. Cruz Villalón, P. (1984), *Estados excepcionales y suspensión de garantías*, Madrid, Tecnos.

⁸ Vid. STC 199/1987 de 16 de diciembre y Sentencia del Tribunal Europeo de Derechos Humanos de 18 de enero de 1978 Caso Irlanda contra Reino Unido.

general la circulación de cualquier persona, por cualquier lugar y en cualquier momento y los casos excepcionales que justificaban la circulación quedaban en manos del Gobierno que actuó sin la previa autorización del Congreso de los diputados. Concluye el TC que lo que se produjo fue un vaciamiento del derecho o cesación del mismo.

Por el contrario, el TC no considero inconstitucional el art. 9 del RD 465/2020 relativo a la suspensión de la presencialidad de la actividad educativa. Explica el Tribunal que el art. 27 CE, que regula el derecho a la educación, no contempla expresamente la obligación de que la educación tenga que ser presencial. La Ley Orgánica 2/2006 sí contempla la obligación de que la educación sea presencial, pero ofrece la posibilidad de recurrir a entornos de aprendizaje virtuales. Además, a diferencia de lo que ocurría con el derecho a la libertad de circulación, en este caso, las dificultades de acceso a este derecho no tenían un alcance general, sino limitado a un reducido porcentaje de la población que tenía más limitaciones para acceder a medios de aprendizaje virtual. Del mismo modo la limitación de este derecho fue considerada por el Tribunal como proporcional, pues era la menos lesiva que podía adoptarse teniendo en cuenta las consecuencias de la pandemia⁹.

Tampoco consideró el TC que se hubiera producido una vulneración del art. 21 CE relativo al derecho de reunión y manifestación, pues la normativa relativa al ejercicio de este derecho no fue alterada ni modificada, con independencia de que su ejercicio pudiera verse limitado en concreto, de manera motivada y proporcionada, para la protección de la salud pública y del derecho a la vida. Además, el art. 21.2 CE y los artículos 8 y 9 de la Ley Orgánica 9/1983 permiten a la autoridad administrativa prohibir las manifestaciones y reuniones en lugares de tránsito público cuando existen razones fundadas de alteración de orden público, con peligro para personas y bienes.

En cuanto al derecho a la libertad de culto y la libertad de expresión religiosa recogido en el art. 16 CE, el Tribunal Constitucional considera que el derecho no fue vulnerado por el Real Decreto, pues el art. 11 del Real Decreto permitía las ceremonias religiosas con las medidas organizativas adecuadas para evitar aglomeraciones y garantizar la distancia mínima entre los asistentes. Además, el propio art. 16. 1 CE establece un límite a la libertad religiosa y a la libertad de culto que es el mantenimiento del orden público protegido por la ley. Parte de la doctrina ha sido muy crítica con este pronunciamiento del TC, pues considera que si el art. 7 del Real Decreto no contemplaba como una causa justificada el circular por la vía pública para acudir a lugares de culto, el derecho quedaba *de facto* suspendido al igual que quedaba el derecho a la libertad de reunión y manifestación¹⁰.

Concluye el TC su sentencia dando a entender que el Gobierno debería de haber declarado un estado de excepción y no un estado de alarma, pues las medidas adoptadas eran las propias de un estado de excepción. Aunque el art. 4 de la LO 4/1981 reserva

⁹ Vid. Muñoz Gómez, A. (2021), “El control de constitucionalidad del estado de alarma: comentario a la STC148/2021, de 14 de julio”, Icade. *Revista de la Facultad de Derecho*, núm. 112 (julio-diciembre 2021).

¹⁰ Vid. Muñoz Gómez, A. (2021), “El control de constitucionalidad del estado de alarma: comentario a la STC 148/2021, de 14 de julio”, Icade. *Revista de la Facultad de Derecho... op.cit.*

la declaración del estado de alarma para las crisis sanitarias o pandemias, el COVID-19 tuvo y esta teniendo, efectos muy graves no sólo para la salud de las personas, sino también para la sociedad, la economía, el funcionamiento del Estado y la vida en general¹⁰. Es por ello, por lo que el TC considera que la situación de pandemia había generado una circunstancia justificativa de la declaración del estado de excepción contemplada en el art. 13 LOEAES, como es la afectación al “libre ejercicio de los derechos y libertades de los ciudadanos, el normal funcionamiento de las instituciones democráticas, el de los servicios públicos esenciales para la comunidad, o cualquier otro aspecto del orden público (...)”. En definitiva, lo que viene a decir el TC es que se declaró un estado de excepción encubierto por un estado de alarma. Ahora bien, si se hubiese declarado el estado de excepción, el Gobierno se habría visto obligado a estar sujeto al control popular que supone la autorización del Congreso de los diputados *ex ante* y *no ex post* y la prórroga del estado de excepción habría quedado limitada a una sola de 30 días.

Para concluir, el Tribunal Constitucional no censura las medidas restrictivas de derechos fundamentales adoptadas durante la pandemia, lo que sí sanciona es el instrumento jurídico utilizado para la adopción de estas medidas. Esta decisión adoptada por el Tribunal Constitucional no estuvo exenta de discordia incluso entre los propios magistrados, pues la sentencia fue aprobada por 6 votos en contra de 5. Así, los votos particulares que se apartaron de la decisión mayoritaria del Tribunal argumentan que las medidas adoptadas fueron justificadas y proporcionales y adecuadas al estado de alarma, pues el estado de excepción está previsto para problemas de orden público con connotaciones políticas y el de alarma está previsto para catástrofes y problemas de pandemia¹².

Por su parte, el magistrado Conde-Pumpido, en su voto particular, manifiesta que la sentencia “crea un grave problema político y sanitario al desarmar al Estado contra las pandemias privándole del instrumento que la ley determina expresamente para hacer frente a las crisis sanitarias, que es el estado de alarma”¹³. La magistrada María Luisa Balaguer Callejón considera que la sentencia crea inseguridad jurídica y manifiesta que el juicio de constitucionalidad debería de haber recaído en la proporcionalidad de las medidas y no tanto en la afcción de los derechos fundamentales, pues el presupuesto del estado de alarma que establece el art. 4 de la LOEAES es el de pandemia que es el que se estaba dando en ese momento y no el propio del estado de excepción del art. 13 LOEAES. Continúa esta magistrada alegando que la sentencia incurre en contradicción, pues, si lo

¹¹ *Vid.* Decisión de 20 de mayo de 2021 del Tribunal Europeo de Derechos Humanos (Caso Terhes contra Rumanía)

¹² *Vid.* Voto particular del magistrado del Tribunal Constitucional Juan José González Rivas y del magistrado Andrés Ollero Tassara respecto a la STC 148/2021, de 14 de julio pronunciada en el recurso de inconstitucionalidad núm. 2054-2020. Ver también Tomico Mar, (2021), “Los votos particulares reflejan las dudas de los magistrados ante la declaración del Constitucional sobre el estado de alarma”, *Newtral*, accesible en <https://www.newtral.es/votos-particulares-sentencia-tribunal-constitucional-estado-de-alarma/20210720/> (última consulta 12 de mayo de 2022).

¹³ *Vid.* Voto particular del magistrado del Tribunal Constitucional Cándido Conde-Pumpido y de la magistrada María Luisa Balaguer Callejón respecto a la STC 148/2021, de 14 de julio pronunciada en el recurso de inconstitucionalidad núm. 2054-2020.

que se censura es la declaración del estado de alarma, debería de haberse declarado inconstitucional todo el Real Decreto y no fragmentos del mismo¹⁴.

El magistrado Juan José González Rivas, en su voto particular, contradice la sentencia del TC y manifiesta que no hubo suspensión de derechos fundamentales, pues esta suspensión sólo se da cuando se sustituye formalmente la vigencia del derecho por el régimen jurídico establecido por el Gobierno, lo que en este caso no ocurrió según este magistrado. También considera Juan José González Rivas que el análisis de la constitucionalidad de las medidas debería de haberse hecho desde la misma óptica con la que se resolvió la prohibición de manifestación de vehículos en Vigo en el Auto 40/2020, es decir, el TC debería haberse limitado a analizar si las medidas adoptadas por el Gobierno atendían a un fin legítimo (la protección de la salud y de la vida) y si eran adecuadas y proporcionales para alcanzar ese fin, es decir, si eran las menos lesivas para la consecución de ese fin legítimo¹⁵.

Por último, el magistrado Juan Antonio Xiol Rios considera que la suspensión de un derecho debe hacerse mediante un acto formal, es decir, exige una decisión expresa por la que se prive de eficacia a la norma constitucional. No existe suspensión por el hecho de restringir el derecho fundamental, incluso aunque la restricción impuesta sea de tal entidad que se impida su ejercicio. Añade este magistrado que los derechos fundamentales no son absolutos sino que admiten limitaciones en aras de proteger otros valores o derechos constitucionales; la limitación mientras que sea proporcional, adecuada, se adopte para proteger un fin legítimo y respete el contenido esencial del derecho, es constitucional. Añade este magistrado que aunque, *de facto*, el derecho a la libre circulación fuese vaciado de contenido durante la pandemia, el derecho no había sido suspendido, pues la norma seguía existiendo y las limitaciones, aunque fueran de una intensidad similar a la suspensión, estaban sometidas al control judicial y constitucional¹⁶.

Juan Antonio Xiol Rios también considera que la declaración del estado de excepción hubiese supuesto menos garantías para los ciudadanos y hubiese tenido una duración más limitada, pues si bien es cierto que el Gobierno debería de haber solicitado autorización previa al Congreso, esta autorización habría tenido una duración limitada de 2 meses. Además, el estado de excepción hubiese permitido al Gobierno suspender la vigencia del régimen legal y constitucional de los derechos fundamentales y el Tribunal Constitucional únicamente hubiese podido controlar las decisiones del Gobierno comprobando si se adecuaban a la ley orgánica del estado de excepción y si cumplían el fin legítimo, pero no podría haber controlado la proporcionalidad de las medidas.

¹⁴ *Vid.* Voto particular de la magistrada María Luisa Balaguer Callejón respecto a la STC 148/2021, de 14 de julio pronunciada en el recurso de inconstitucionalidad núm. 2054-2020.

¹⁵ *Vid.* Voto particular del magistrado del Tribunal Constitucional Juan José González Rivas respecto a la STC 148/2021, de 14 de julio pronunciada en el recurso de inconstitucionalidad núm. 2054-2020.

¹⁶ *Vid.* Voto particular del magistrado del Tribunal Constitucional Juan Antonio Xiol Rios respecto a la STC 148/2021, de 14 de julio pronunciada en el recurso de inconstitucionalidad núm. 2054-2020.

En definitiva, los derechos fundamentales son la principal arma con la que contamos los ciudadanos para defendernos de los poderes del Estado. Sin embargo, nuestro ordenamiento jurídico prevé situaciones y circunstancias excepcionales que habilitan al Gobierno para ejercer un poder exorbitante con el que puede incluso limitar y suspender esos derechos fundamentales. El Covid-19 ha supuesto un desafío sanitario, social, económico y jurídico y el Gobierno ha utilizado como arma de combate el estado de alarma. Aunque la clase de arma utilizada no ha estado exenta de polémica, en lo que parece coincidir la mayoría de la doctrina es en que los daños causados por ese arma (limitación de derechos fundamentales) eran necesarios, proporcionales y adecuados para salvar bienes jurídicos tan importantes como la vida y la salud de la población.

BIBLIOGRAFÍA:

Legislación:

- Constitución Española.
- Orden SND/298/2020, de 29 de marzo, por la que se establecen medidas excepcionales en relación con los velatorios y ceremonias fúnebres para limitar la propagación y el contagio por el COVID-19.
- Ley Orgánica 4/1981, de 1 de junio, de los estados de alarma, excepción y sitio.
- Ley Orgánica 9/1983, de 15 de julio, reguladora del derecho de reunión.
- Ley Orgánica 7/1980, de 5 de julio, de Libertad Religiosa.
- Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación.
- Real Decreto 926/2020, de 25 de octubre, por el que se declara el estado de alarma para contener la propagación de infecciones causadas por el SARS-CoV- 2.
- Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, por el que se declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19.

Jurisprudencia:

- Auto del TC de 30 de abril de 2020.
- Decisión de 20 de mayo de 2021 del Tribunal Europeo de Derechos Humanos (Caso Terhes contra Rumanía)
- STC 83/2016, de 28 de abril.
- STC 199/1987 de 16 de diciembre.
- Sentencia del Tribunal Europeo de Derechos Humanos de 18 de enero de 1978 Caso Irlanda contra Reino Unido
- Voto particular de los magistrados del Tribunal Constitucional, Andrés Ollero Tassara , Cándido Conde-Pumpido, María Luisa Balaguer Callejón, Juan Antonio Xiol Rios y Juan José González Rivas respecto a la STC 148/2021, de 14 de julio pronunciada en el recurso de inconstitucionalidad núm. 2054-2020.

Artículos doctrinales:

- Carmona Cuenca, E (2021), “Estado de alarma, pandemia y derechos fundamentales. ¿Limitación o suspensión?”, *Revista de Derecho Político Uned*. Núm. 112, septiembre-diciembre 2021, pp. 13-42.
- Cruz Villalón, P. (1984), *Estados excepcionales y suspensión de garantías*, Madrid, Tecnos.
- Garrido López, C. (2020), “La naturaleza bifronte del Estado de alarma y el dilema limitación suspensión de derechos”, *Teoría y Realidad Constitucional* Núm. 46, pp. 393-394.
- Muñoz Gómez, A. (2021), “El control de constitucionalidad del estado de alarma: comentario a la STC148/2021, de 14 de julio”, *Icade. Revista de la Facultad de Derecho*, núm. 112 (julio-diciembre 2021).
- Presno Linera, M. (2020), “Coronavirus SARS-Cov-2 y derechos fundamentales: El derecho a la educación” publicado el 6 de mayo de 2020 en: <https://presnolinera.wordpress.com/category/derechos-fundamentales/> (última fecha de consulta: 10 de mayo de 2022).
- Presno Linera, M.A. (2021), “El derecho de reunión durante el estado de alarma sanitaria por Covid-19”, en Garrido López, C. (Coord.), *Excepcionalidad y Derecho: El estado de alarma en España*, Zaragoza, Fundación Manuel Giménez Abad, pp. 197-224.
- Tomico Mar, (2021), “Los votos particulares reflejan las dudas de los magistrados ante la declaración del Constitucional sobre el estado de alarma”, *Newtral*, accesible en <https://www.newtral.es/votos-particulares-sentencia-tribunal-constitucional-estado-de-alarma/20210720/> (última consulta 12 de mayo de 2022).

CV:

- Graduada en Derecho y Administración y Dirección de Empresas.
- Premio extraordinario de trayectoria académica de Andalucía.
- Segundo premio nacional de mejor expediente académico en el grado de Administración y Dirección de Empresas y tercer premio nacional de mejor expediente académico en el grado de Derecho.
- Actualmente estudiante del master del ejercicio de la función jurisdiccional y jueza en prácticas.

Arte y Ajedrez

Manuel Bahos Farfán

Profesor de matemáticas del IES Miraflores de los Ángeles de Málaga,
coordinador y miembro del Equipo de Coordinación Pedagógica
del programa aulaDjaque

Todo comenzó hace más de tres años, en concreto en diciembre de 2018, cuando investigando por internet me encontré que había algunas relaciones del ajedrez con varios tipos de arte. En concreto, descubrí algunas páginas, tales como:

[Scaccimusic](#)¹ (trabajo realizado por Jesús Osorio Carpeño del IES del I.E.S. Valle del Saja)

[IA creando Música](#)² (proyecto FlowMachines de Sony CSL)

[Chess Poetry](#)³ (programa online para crear poesía a través de partidas de ajedrez)

Los jugadores de ajedrez y la música⁴ (artículo de la revista Sineris)

[BeWitched](#)⁵ (inteligencia artificial para crear arte visual jugando una partida de ajedrez)

[Ajedrez+Música](#)⁶ (proyecto realizado por Victoria Alba del IES Eduardo Janeiro)

Lo descubierto en las páginas anteriores me hizo pensar que se podría intentar unir el ajedrez con algún tipo de arte, en concreto, con la música. Tomando como base el proyecto realizado por la profesora Victoria Alba del IES Eduardo Janeiro, la idea principal era mejorar esa línea de trabajo.

En enero de 2019, nos reunimos los profesores Víctor J. Fuentes Martínez (asignatura de informática), Javier Jiménez Botella (asignatura de música) y Manuel Bahos Farfán (asignatura de ajedrez) del IES Sierra de Mijas planteando la posibilidad de unir las asignaturas de ajedrez, informática y música. Llegamos a la conclusión que usando la informática (a través de un programa en lenguaje Python) se podrían pasar los movimientos de una partida de ajedrez a notas musicales.

Para llevar a cabo nuestra idea y conseguir ayuda económica, presentamos en febrero de 2019 el proyecto para la elaboración de materiales curriculares y recursos didácticos titulado “La creación musical a través del ajedrez”. En este documento conseguimos crear música a través de los movimientos de una partida de ajedrez. En concreto, esa partida es la realizada por Kaspárov y el ordenador DeepBlue en mayo de 1997. Los movimientos de cada pieza de ajedrez tienen asociado una nota musical.

En este primer proyecto, se realizó una agrupación de cinco piezas que tenían asociada cinco notas musicales, por tanto, habíamos logrado una escala pentatónica. Es decir, teníamos las relaciones:

Peones=DO

Torres=RE

Caballos=MI

Alfiles=SOL

Dama-Rey=LA

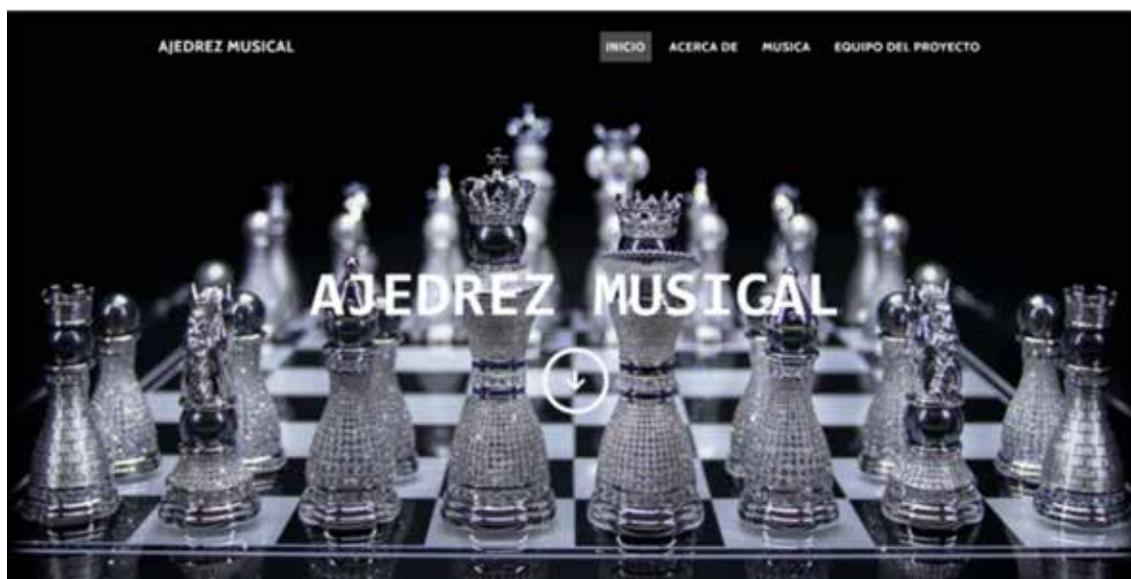
En el caso de las capturas, enroques y jaques tenían asociados silencios.

Además, la partida estaba escrita en notación algebraica larga porque permitía dar duración a la nota musical, en concreto, un movimiento de 7 casillas correspondía a una redonda.

En septiembre de 2019, por motivos laborales, los tres creadores de este proyecto nos separamos en distintos centros. Esta situación no provocó el fin del proyecto, sino que significó la posibilidad de ampliar el número de centros involucrados. En concreto, Manuel Bahos llevó el proyecto al IES Miraflores de los Ángeles, Javier Jiménez al IES Sierra de Mijas y Víctor Fuentes al IES Antonio de Mendoza.

A finales de 2019 se plantea la creación del Primer Torneo Interprovincial de Ajedrez Musical y se fija el día 14 de abril de 2020 para llevarlo a cabo. Para promocionar este primer torneo, en enero de 2020, se participa en el programa de radio “El Rincón del Ajedrez” de [Radio Victoria](#)⁷ dirigido por Roberto López y Manuel Azuaga. Por motivos de la pandemia, se tiene que retrasar el primer torneo hasta que las condiciones sanitarias lo permitan.

En septiembre de 2020, se incorpora al proyecto el IES Pablo Picasso que aporta al proyecto un servidor web <http://iespablocicasso.sytes.net:5000/>⁸ donde se aloja el programa que genera las notas musicales. De esta forma, cualquier centro puede subir sus partidas en notación algebraica larga y obtener las notas musicales asociadas de la escala pentatónica con la duración de cada nota musical.



Captura de pantalla de la página inicial del servidor web

En 2021, se remodela el programa escrito en Python para pasar desde la escala pentatónica (5 notas musicales) a la escala diatónica (7 notas musicales). En esta nueva escala consideramos varias relaciones y se realizaron muchas pruebas hasta llegar a la mejor de todas ellas. En concreto, la relación final es:

peones=DO
 caballos=RE
 dama=MI
 rey=FA
 alfiles=SOL
 torres=LA
 captura de peón=SI

En el caso de otras capturas, enroques y jaques tenían asociados silencios.

Con esta remodelación, además se mejora la interfaz del servidor web consiguiendo que las partidas se puedan exportar directamente desde el portal Lichess usando el formato pgn para una mayor compatibilidad. Además, en esta actualización se elimina la duración de las notas y con ello se deja en manos de los profesores de música indicar la duración de cada nota para dar más libertad a la creatividad.

En septiembre de 2021, se amplía el proyecto con la incorporación de la asignatura de educación plástica y visual mediante la participación de la profesora Ana Góngora. Para el apartado artístico se utiliza el programa de código abierto GIMP donde a cada pieza de ajedrez se le asocia un color y el movimiento de la pieza nos indica la dirección del trazo. A partir de este momento, el proyecto se le considera artístico musical.

Todo el trabajo realizado hasta este momento empieza a dar sus frutos porque en noviembre de 2021, el IES Miraflores de los Ángeles recibe un premio por el proyecto que está llevando a cabo junto a otros centros y se publica en varios medios, como [“Europa Press”](#).

Para dar más publicidad al proyecto, se presenta el vídeo titulado [“Arte y Ajedrez 2022”](#) creado por la profesora Ana Góngora, al concurso de “Corto y jaque” y donde se muestra el proyecto del ajedrez artístico musical.



Código QR al vídeo presentado

Por fin, dada la mejoría de las condiciones sanitarias se realiza el Primer Torneo Interprovincial de Ajedrez Musical el día 11 de mayo de 2022 donde participan cinco centros de tres provincias distintas. En concreto, los centros son el IES Antonio de Mendoza (Jaén), IES Miraflores de los Ángeles (Málaga), IES Sierra de Mijas (Málaga), IES La Madraza (Granada) e IES Severo Ochoa (Granada). En este torneo, a todos los participantes se les regaló una de sus partidas en forma de armónicos sonidos. Este evento tuvo gran repercusión y apareció en algunos medios, como en el periódico “[Diario de Jaén¹¹](#)”. Teniendo en cuenta la buena acogida de este Primer Torneo Interprovincial de Ajedrez Musical, los centros participantes muestran su interés por la continuidad de dicho evento.

Llegando a la parte final de este artículo, podemos asegurar que hemos logrado dar respuesta a nuestra pregunta inicial y hemos conseguido crear arte a través del ajedrez.

Por último, comentar que este proyecto sigue vivo y con ganas de continuidad. Los creadores de este proyecto y todas las personas que han estado implicadas muestran su interés en ampliar el número de centros. También, hay interés en añadir más asignaturas y en lograr una mayor repercusión mediática.

WEBGRAFÍA

1. <https://www.ajedrezalaescuela.eu/scaccimusic-ajedrez-y-musica/>
2. <https://www.xataka.com/robotica-e-ia/la-inteligencia-artificial-ya-es-capaz-de-componer-musica-y-estas-canciones-lo-demuestran>
3. <http://chesspoetry.com/translate/>
4. https://sineris.es/musica_y_ajedrez_walid_hedari.html
5. <https://www.bewitched.com/chess/>
6. https://ajedrezsocial.org/musica_rudenko/
7. <https://www.radiovictoria.es/>
8. <http://iespablopicasso.sytes.net:5000/>
9. <https://www.europapress.es/esandalucia/malaga/noticia-arranca-quinto-ano-aula-dajaque-programa-fomento-ajedrez-participan-93-centros-educativos-malaga-20211108123451.html>
10. <https://www.youtube.com/watch?v=a6UbZCyB92s>
11. <https://www.diariojaen.es/provincia/alcala/torneo-interprovincial-de-ajedrez-musical-JM8394193>

“Aerospace Mendoza” IV Bilingual Fair en el IES Antonio de Mendoza

Ascensión Rabaneda Jimenez,

Profesora de Inglés y Coordinadora del Programa Bilingüe.

Víctor J. Fuentes Martínez,

Profesor de TIC y Coordinador proyecto STEAM

Ignacio López Anguita

Alumno de 2º ESO

- Introducción realizada por Víctor Fuentes:

Para el 25 aniversario de nuestro instituto, nos hemos convertido en investigadores aeroespaciales. Aprovechando la participación en el programa STEAM: Investigación Aeroespacial aplicada al aula, hemos creado nuestro proyecto “Aerospace Mendoza”. Un proyecto interdisciplinar que ha reunido el trabajo de todos los departamentos del centro y ha involucrado a todo el alumnado del Mendoza. Cada departamento ha preparado en sus distintas asignaturas materiales, experimentos, talleres, demostraciones en vivo, y muchos contenidos más. Todo este trabajo culminó en una feria bilingüe y divulgativa que tuvo lugar los días 4 y 5 mayo.

Los distintos alumnos del instituto, así como otros centros escolares y el AMPA pudieron disfrutar de todas las experiencias que prepararon nuestros alumnos y alumnas sobre la investigación aeroespacial. Algunos de los talleres más emocionantes del “Aerospace Mendoza” fueron: el estudio de enfermedades que producía la gravedad 0 en los astronautas, la fabricación y lanzamiento de cohetes de agua, la construcción y programación de robots lunares, el estudio del tamaño y distancias del sistema solar, la reproducción de piezas musicales de bandas sonoras de películas del espacio, la cocina de comida para astronautas, la “cité de l’espace” de Toulouse, un timeline de la carrera espacial entre EEUU y Rusia, entrenamientos para astronautas y el estudio de grabación y entrevistas de personajes importantes como los astronautas. Esto y muchas cosas más se pueden consultar en la web del centro:

<https://iesantoniodemendoza.com/aerospace-mendoza/>

- Extracto de la publicación realizada por Ascensión Rabaneda en la revista de actividades del curso escolar “la Chuleta”. Colabora el alumno de 2º de ESO, Ignacio López Anguita:

“Aerospace Mendoza” IV Bilingual Fair

The idea of “Aerospace Mendoza” emerged after a casual conversation among some teachers back in September 2021. We needed to provide our bilingual programme a boost

and to enhance interdisciplinarity to achieve a less compartmentalized and meaningful learning. For this reason, we saw a great opportunity to join STEAM education and bilingualism since we had just been provided with a “STEAM Project: Investigación Aeroespacial aplicada al aula”.

Thus, we had the participation and collaboration of all didactic departments together with our Language Assistant, Isabel Buckley, our students, janitors and school community.

This year the fair was held on May 4 and 5. The playground was divided into different stands and corners where all departments exhibited and presented their projects to our own students and to our guests from the primary schools nearby, CEIP José Garnica Salazar and CEIP Alonso de Alcalá.

In addition we were delighted with the visit of our Bilingual Supervisor in Jaén Pedro Manuel Díaz Santos.

We have fostered and improved the knowledge of “space” in every subject this academic year. Every didactic department created and/or collaborated into different interdisciplinary projects, workshops, investigations, rocket launches and many other activities that will be presented below.

IV Bilingual Fair
“Aerospace Mendoza”



The central logo is a circular emblem with a dark blue space background. It features a yellow comet streak, a ringed planet (Saturn), a red planet (Mars), and a white rocket launching from a blue and green Earth. The text 'AEROSPACE MENDOZA' is written in white and yellow in the center.



The logo for the 25th anniversary of IES Antonio de Mendoza, featuring a stylized yellow and white fan-like shape. Text includes '25 ANIVERSARIO' and 'IES ANTONIO DE MENDOZA'. A small credit 'Designed by Daniel Pérez' is visible.



A circular logo for 'Escuela José Celestina' with a yellow sun and green leaves. Text includes 'Escuela José Celestina' and 'The primary school of the city of Jaén'.

PROYECTO STEAM: INVESTIGACIÓN AEROESPACIAL APLICADA AL AULA

 www.iesantoniodemendoza.com

It has been a pleasure to commemorate the 25th anniversary of our center with this project.

- **English Department:** *Women and Men in Space, Space Timeline, Getting Ready for Space, Aerofads, Space Stars*
- **French Department:** *Toulouse, La ville de Toulouse, Découvrir la Cité de l'espace, Expositions Temporelles*
- **Spanish Language and Literature:** *Representación teatralizada de los planetas y sus referentes en la mitología.*
- **Physical Education:** *Crossfit for astronauts, Ready, Steady, Go!!!*
- **Gastronomy Area:** *Space Food and Beverage, Space Snacks, How do astronauts eat?*
- **Geography and History Department:** *The Universe, The Solar System, WorldView of Ancient Civilizations, Space Race, The Earth*
- **Sciences Department:** *Detection of exoplanets, Crystalline structures beyond the Earth, Materials and Physical magnitudes in a rocket, Space scientists, Astronauts' diets and diseases, ESERO challenge: "Climate Detectives"*
- **Technology Department:** *Eggnouts, Aerospace Research, Aerospace Robots, Water Rockets Launch, ESERO Challenge: Astro PI Mission Zero*
- **Music Department:** *Scores of film soundtracks whose theme is the world of space, Understand the plot of the films: '2001: A Space Odyssey and Star Wars', interpretation with instruments of the most famous melodies of the movies.*
- **Maths Department:** *Sistema solar a escala sobre el porche, Sistema solar a escala sobre mapas del entorno, Gráfica de la ley de Titius-Boda.*

ENGLISH DEPARTMENT

Women and Men in Space

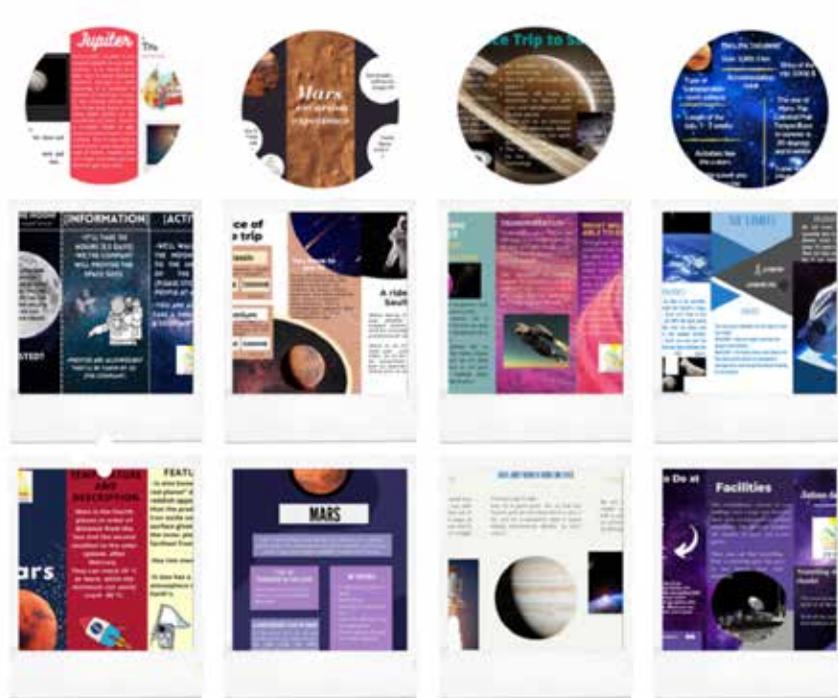
The students in **Secondary 1** did some research about relevant "Women and Men in space".



Space Travel Brochures

The students in **Secondary 2** made us travel thousands of miles through their eye-catching **travel brochures**. It has been quite an enriching interdisciplinary project among maths, geography & history and English.

They owned a TRAVEL AGENCY that was specialized in Space Travel so they prepared tri-fold travel brochures to advertise a trip throughout the solar system. The result was impressive!



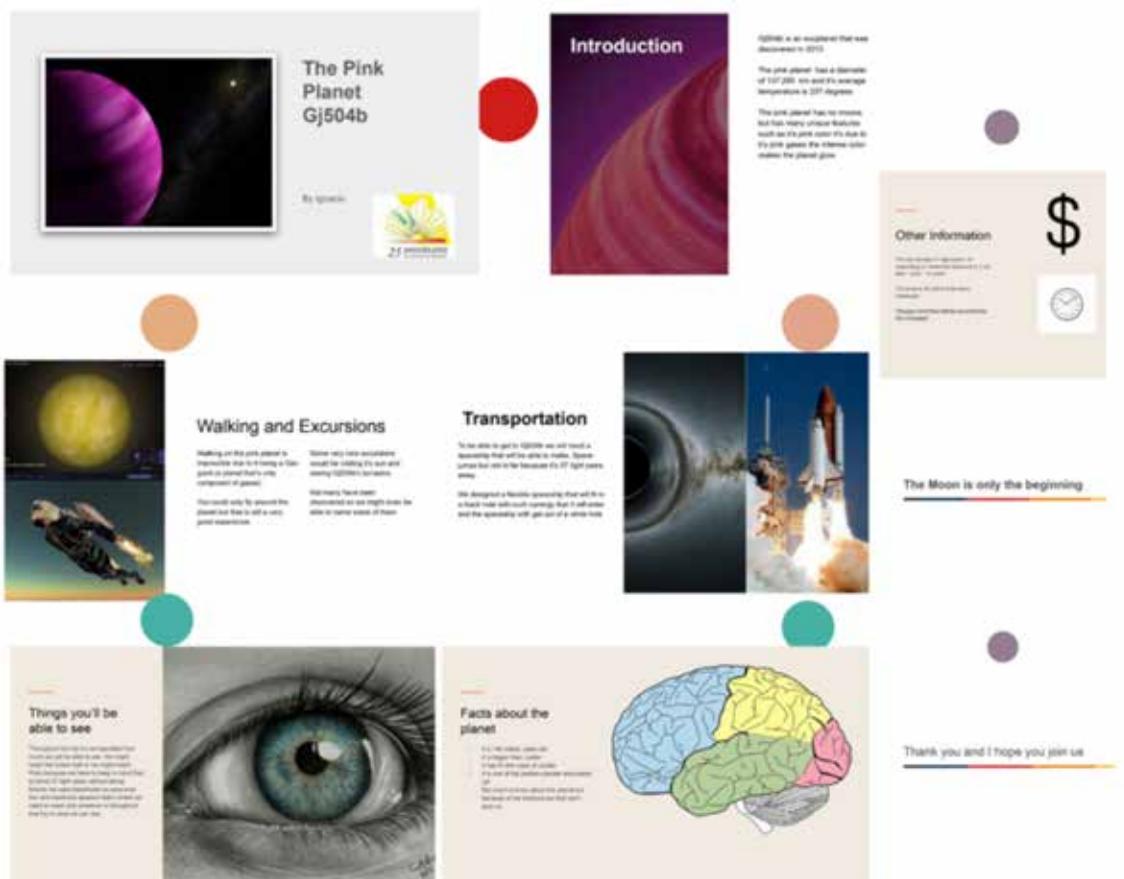
One of our students in Secondary 2, **Ignacio López Anguita** wanted to share his experience:

“Hello I’m a fourteen year old student at IES Antonio de Mendoza living in a town located in the province of Jaén called Alcalá la Real (Spain). This was my contribution to the Aerospace project at my school.

In this project we had to locate a planet whether it was invented or from the internet, in my case I decided to use one that was actually real, my first option was J1407b due to his mind-blowing rings. I later found out that not much information was found about the planet so I changed my planet and I chose GJ504b. This planet had enough information so I started my research.

I had to answer a series of nine questions which included making a slogan, how would you get there and information about the trip like prices, accommodations, time and safety. I had to answer as logically as possible even though we didn’t have the technology. Despite that issue, I managed to answer the questions somewhat logically.

This project was very fun and entertaining and it gave me the chance to show just a snippet of how much I really know about space. Lastly, I hope that in my school we can have the same project next year”.



Space Timeline

The students in **Secondary 3** created a “Space Timeline” from “Big Bang Theory” to our present days. They did some research about the dates chosen and created QR codes that are displayed on the timeline aforementioned. In the process of completing this project they developed their knowledge about the topic and in addition to this organizational research and communicative skills were improved.

They explained the whole timeline to their audience in English. It was truly enriching!



Getting Ready For Space

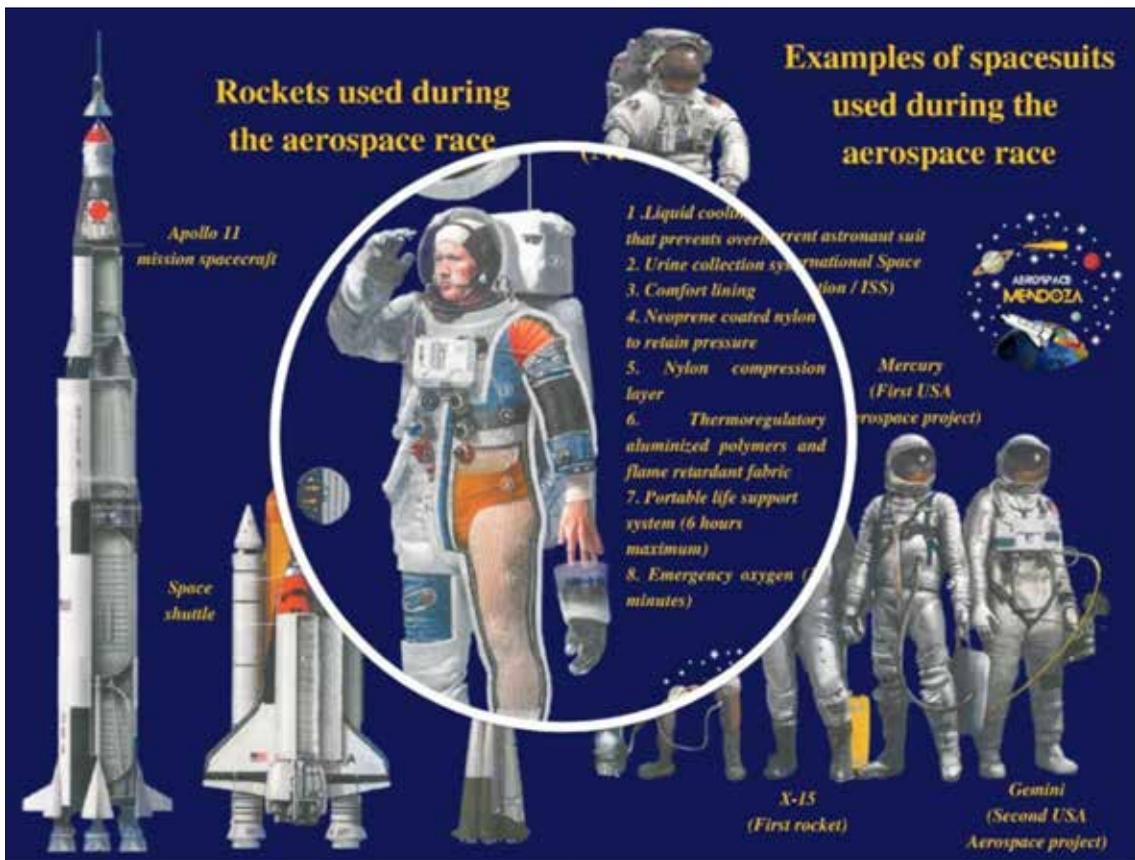
As part of our “Aerospace Mendoza” project and collaborating with the bilingual subject of Biology and Geology, our students in **Secondary 3** elaborated several videos where they explained what a day in the life of an astronaut would be like and how they should eat that day to meet their needs. They **used** the infographics created with their biology teacher Patricia Pérez López to do the videos.





Aerofads

One of our students in **Secondary 4**, **Daniel Pérez Estévez** designed three posters to show the evolution of spacesuits from the one used by Neil Armstrong to the ones used during the Aerospace Race and the current astronaut suit that nowadays they use in the International Space Station (ISS). In addition, he designed another poster showing rockets used during the Aerospace Race.



Space stars and what's up?

Our students in **Secondary 4** prepared Space Movie Billboards as part of our Aerospace Mendoza project. They were exhibited on our stand and presented to primary students and to our own ones on May 4 and 5. They were displayed on our "Walk of Space " together with the TV scenario where we enjoyed a fabulous interview programme (What's

Up?) fully designed and created by our students. Famous characters related to “Space” and “Space Race” were interviewed: Neil Armstrong, Chewbacca, David Bowie, Darth Vader and some scientists...All of them performed amazingly!



Space race

In collaboration with the Geography and History subject in 4 CSE the students in Secondary 4 carried out project work around the topic of Space Race in history and English. They created a **timeline** with the main achievements in Soviet and United States spaceflight. They did some research about the dates chosen and created QR codes that were displayed on the timeline aforementioned. In the process of completing this project they developed their knowledge about the topic and in addition to this organizational research and communicative skills were improved. They explained every mission to all of us. It was impressive!



FRENCH DEPARTMENT

Toulouse, La ville de Toulouse, Découvrir la Cité de l'espace, Expositions Temporelles



SPANISH LANGUAGE AND LITERATURE

Dramatized PERFORMANCE about the PLANETS and their referents in MYTHOLOGY



PHYSICAL EDUCATION

Crossfit for Astronauts, Ready, Steady, Go!



PHYSICAL EDUCATION

GASTRONOMY AREA

Space Food and Beverage, Space snacks, How do astronauts eat?



GEOGRAPHY AND HISTORY DEPARTMENT

The Universe, The Solar System, Worldview of Ancient Civilizations, Space Race, The Earth



SCIENCES DEPARTMENT

Detection of Exoplanets

The Biology and Geology students in Secondary 1 learned about exoplanets, their importance and detection methods, being the most used method transit. In this context, the students made a starbox or transit simulator in order to measure one transit using a light sensor. The resulting graphs were analyzed and on-line Esero activities for exoplanets detection were done as well. The result of this research was collected in a series of posters that were exhibited in our science stand.

Finally, a breakout edu about exoplanets was carried out and shown through a QR code in our science stand as well .



Crystalline structures beyond the Earth

The students in Secondary 2 shared their knowledge about metals suitable for building rockets and space suit construction, in order to explain their main characteristics of each material. For example aluminized mylar used for thermal control, neoprene-coated nylon, stainless steel and other high-strength composites, all of them for space suits.

About Spaceships it is important that they are electrically conductive, but they must also be able to prevent electromagnetic radiation from doing so. Besides, they must be able to both heat up and cool down quickly with the rest of the spacecraft to avoid temperature-related damage.

Other students have studied some space shuttle programs, and what happened to the space shuttles, or also some infographic about important space missions as Phoenix “mission to Mars”.

Space Scientists, Astronauts' Diets and Diseases

The Biology and Geology students in Secondary 3 delved into the needs of astronauts preparing to go to space, as well as the most common diseases they suffer from during their space travel.

On the one hand, and under the title “A day in the life of an astronaut: eating well to be healthy”, the students investigated what a day in the life of an astronaut would be like and how they should eat that day to meet their needs, considering your demanding workouts. The result of their investigations was collected in a series of posters that were exhibited in our science stand.

On the other hand, the most common diseases that affect astronauts were also investigated. To this end, two activities were carried out: first, informative leaflets on these diseases were prepared, discussing their causes, their symptoms and how to treat and prevent them. In addition, the main diseases were located in the organs that were most affected, using the torso of the human body from our science laboratory and QR codes that directed us to the works that the students themselves had prepared in this regard. This project was called “Getting Sick in Space: Most Common Illnesses in Astronauts.”



Materials and Physical Magnitudes in a Rocket

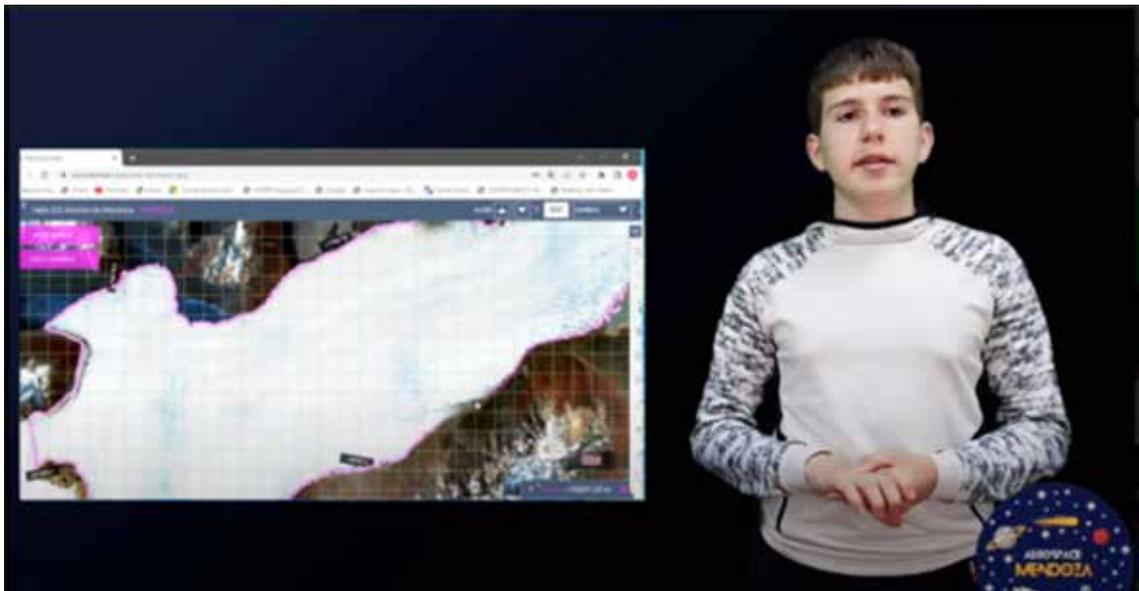
They have also improved their knowledge about water rockets. The pressure chamber, the rocket motor, is usually a plastic bottle. The water is thrown out by a pressurized gas, usually compressed air, which propels the rocket, according to Newton's 3rd law.

Besides, students were able to calculate the height reached by the water rocket by measuring its flight time.

ESERO Challenge: “Climate Detectives”

In the case of 4th ESO students, our research was aimed at relating climate change to its effects on life on Earth. Thus, Daniel Pérez, Jairo Carillo and Antonio Jesús Flores decided to participate in one of the challenges proposed by the ESA, called “Climate Detectives”. His project “Mendoza Detectives S.E.” relates the melting of the Perito Moreno glacier, and the consequent rise in sea level, with the increase in temperature and the decrease in the ozone layer.

To do this, they used the EO Browser software, which provides access to data from different ESA satellites. Specifically, our students analyzed data and images from the Sentinel satellite. The result of the investigation was a work that was submitted to an international competition and that, although it was not among the 3 best in the world, received very good reviews and congratulations.



FROM PHYSICS AND CHEMISTRY we have studied:

- 1 - What are the most appropriate materials to build a rocket?
- 2 - What are the physical magnitudes in a rocket launch?
- 3 - Some space scientists infographic



TECHNOLOGY DEPARTMENT

Eggnouts, Aerospace Research, Aerospace Robots, Water Rockets Launch, ESERO Challenge: Astro PI Mission Zero



MUSIC DEPARTMENT

Scores of film soundtracks whose theme is the world of space, Understand the plot of the films: '2001: A Space Odyssey and Star Wars', interpretation with instruments of the most famous melodies of the movies.

Our students in Secondary 1 and 2 did some research and studied the music in some films.



MATHS DEPARTMENT

Sistema solar a escala sobre el porche, Sistema solar a escala sobre mapas del entorno, Gráfica de la ley de Titius-Bode.





25 ANIVERSARIO
IES ANTONIO DE MENDOZA