

Las dificultades de cristalización de cloruro de sodio (NaCl): un proyecto de investigación integrador del currículo de Ciencias en ESO y Bachillerato

Francisco Rojas Melgarejo

Resumen: Estudiamos la velocidad inicial de crecimiento de cristales de sal marina, formados por evaporación del agua a partir de una disolución saturada de esta sal. Mostramos la diferente forma de cristalización dependiendo de la estación del año en que nos encontremos, con una velocidad de crecimiento muy superior a principios de verano en comparación con la medida a inicios de otoño y una clara imposibilidad de formación de cristales de NaCl en plena estación otoñal. Estos resultados sugieren nuevos estudios para optimizar el final del período de cristalización y el inicio de la campaña de extracción de la sal formada.

Palabras clave: cloruro de sodio, sal marina, cristalización, velocidad de crecimiento, evaporación del disolvente.

Abstract: We study the initial growth rate in marine salt crystals which have been formed by solvent evaporation from its own saturated solution. We show the different crystallization process depending on the season in which we carry out this process. At the beginning of the summer, the growth rate is significantly higher if we compare it to the one obtained in early autumn. In addition, the crystallization of NaCl is not possible in mid-autumn. These results suggest further research in order to optimize the end of the crystallization period and the beginning of the extraction period of salt crystals.

Keywords: sodium chloride, marine salt, crystallization, growth rate, solvent evaporation.

INTRODUCCIÓN

Este artículo parte de la necesidad surgida a un grupo de estudiantes del IES Dos Mares de San Pedro del Pinatar, durante su participación en el VII Finde Científico 2016 celebrado los días 22 y 23 de octubre de 2016 en la ciudad de Alcobendas (Madrid). A esta feria científica nuestros estudiantes acudieron con una propuesta científica titulada «El Lenguaje de la Química en la Naturaleza» estructurada en tres talleres. Uno de ellos se basaba en un trabajo realizado en cursos anteriores^[1] y consistía en visualizar el crecimiento de cristales de cloruro de sodio (NaCl), para, con un adecuado método de captura y procesado de imagen, cuantificar la velocidad inicial de crecimiento real de los cristales formados. Se realizaron diferentes ensayos durante los meses de julio y septiembre. En ellos se reprodujo toda la secuencia de preparación de la muestra a partir de una disolución saturada de NaCl (0,38 g/ml), grabación de la secuencia de cristalización, selección del cristal a estudiar, reproducción de la secuencia, captura de imagen

a los tiempos deseados, traslado a formato de Microsoft Office Word y finalmente conversión a formato PDF. Este proceso se realizó al menos con diez-quince imágenes de cada una de las secuencias de cristalización grabada, para que los resultados y conclusiones obtenidas fueran lo suficientemente fiables.

Las circunstancias climatológicas que se dieron el fin de semana del 22 al 23 de octubre de 2016 en Alcobendas hicieron imposible el desarrollo del taller de cristalización y fue necesario explicar los motivos por los que nuestro trabajo no podía ser mostrado. La exposición de los resultados encontrados resultó más interesante que el contenido del propio taller.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Este trabajo se realiza con estudiantes de 1.º de Bachillerato que han tenido un primer contacto con la Química en la asignatura de Física y Química, y con el trabajo de laboratorio, en la asignatura optativa de Ampliación de Física y Química, cuando cursan 4.º ESO. A los alumnos y alumnas que inician un itinerario académico de carácter científico resulta de interés habituales al quehacer diario del investigador en sus múltiples facetas, con la finalidad de comenzar a emerger su futura vocación científica, pues en la mayoría de los casos resulta una tarea altamente rutinaria, reiterativa y desalentadora ya que buscar permanente soluciones a los innumerables retos que nos plantea resulta altamente agotador a la vez que retador y estimulante. El



F. Rojas
Melgarejo

Universidad de Murcia
Grupo de Química de Carbohidratos, Polímeros y Aditivos
Industriales E047-01
Calle Campus Universitario, 11
30100 Murcia
C-e: projasme@um.es
IES Dos Mares. San Pedro del Pinatar (Murcia)
C-e: francisco.rojas@murciaeduca.es

Recibido: 14/02/2019. Aceptado: 20/06/2019.

laboratorio de química permite trabajar de forma integrada las diferentes competencias básicas del currículo. El estudiante necesitará expresar de forma breve pero con total claridad tanto los objetivos que se pretende como los resultados que se obtendrán (Competencia en comunicación lingüística) y además deberá recurrir a bases de datos digitalizadas (Competencia digital) donde la información estará, en general, en lengua inglesa, destacando siempre el carácter universal del lenguaje matemático (Competencia matemática). En este trabajo se trata de resolver un problema que impide exponer un trabajo preparado y la solución debe encontrarse en un plazo de tiempo determinado. Este trabajo introduce a nuestros estudiantes en otra forma de entender la ciencia y la investigación: la resolución de problemas industriales, sociales, sanitarios o surgidos en líneas principales o prioritarias de investigación (Aprender a aprender y sentido de iniciativa y espíritu emprendedor). Para conseguir nuestro objetivo, el trabajo en grupo resulta imprescindible (Competencias sociales y cívicas). Con sólo diez componentes hay estudiantes de cuatro nacionalidades diferentes que intercambiaron su trabajo e impresiones sin generar conflictos con sus creencias culturales y/o religiosas (Conciencia y expresiones culturales).

Para la búsqueda de la solución a nuestro problema se utiliza la metodología y destrezas alcanzadas con un trabajo anterior^[1] y participa de sus objetivos generales y específicos de proyecto. Aportar a los estudiantes la visión del trabajo científico de resolver problemas que se nos plantean, mejorar líneas de trabajo o tecnologías anteriores y crear otras nuevas, así como describir y comprender los procesos que tienen lugar en la Naturaleza. Mostrar la ciencia como campo de conocimiento abierto e interrelacionado con multitud de disciplinas. Ejemplificar, mediante el cálculo de la velocidad de crecimiento de los cristales de NaCl, la utilización conjunta de diferentes conceptos de Física y Química impartidos en la etapa de Educación Secundaria Obligatoria como la cristalización (3.º ESO), cálculo de velocidades (cinemática, 4.º ESO), utilización de conceptos como proporcionalidad, cálculo y manejo de escalas (Matemáticas), adquisición de destrezas en el uso de herramientas para la visualización y captura de imágenes: lupa binocular, microscopio óptico, cámara de vídeo y fotografía (Biología y Tecnología). Análisis de imagen para la obtención de datos (Informática). Utilización de programas informáticos,^[2,3] para el procesado de datos, elaboración y análisis de tablas y gráficas (obtención de resultados) y redacción de informes, formato doc. y pdf, para su comunicación (Microsoft PowerPoint, Microsoft Word).

MATERIALES

Cloruro de sodio (NaCl) suministrado por Salinera Española, S. A. (San Pedro del Pinatar, Murcia), agua destilada y alcohol etílico 96% suministrados por QUIMICEN 84 (Madrid-España). Para el análisis de imagen se utilizó un dispositivo DC265 Visual Presenter de Lumens Digital Optics Inc., adaptado a una lupa estereoscópica binocular 10x

y objetivo 2x y conectados a un ordenador ACER Aspire 1312LC.

METODOLOGÍA

Tras buscar en bases de datos y consultar diferentes documentos, concluimos que la sal marina, como producto natural que es, debía estar sujeto a unas fechas concretas de explotación y recolección: producto de temporada.^[4,5,6] Estas coinciden con las fechas en las que hay más horas de luz solar y que ésta es de mayor intensidad para facilitar la evaporación del agua y la formación de cristales de NaCl.^[6,7] Este período se alarga desde finales de la primavera hasta el inicio del otoño,^[5,8] con un período de cristalización que suele iniciarse a principios de junio y finalizar la primera semana de septiembre, cuando comienza la campaña de explotación de la sal formada hasta finales de octubre o principios de noviembre. En la campaña 2016, el período de cristalización se alargó hasta el doce de septiembre, día que se inició la campaña de explotación hasta el día once de noviembre de 2016 (Datos suministrados por Salinera Española, S. A.). Cuando a lo largo de la campaña las condiciones climatológicas no son favorables (bajas temperaturas, escaso viento y elevada pluviosidad), la cristalización es más lenta y se obtiene NaCl de grano más pequeño y mayor consistencia, como en el caso de la denominada sal de invierno. Este hecho condicionará las labores de procesado a que se somete el producto inicialmente obtenido y que conducen a la fabricación de los diferentes tipos de sal.^[5,7,9,10]

Para comprobar si este argumento podía explicar el problema de cristalización surgido, se reprodujeron las secuencias de imágenes grabadas. Una secuencia se grabó el día cuatro de julio (período de cristalización de NaCl) y la otra el veintinueve de septiembre de 2016 (campaña de explotación de NaCl). En cada caso centramos nuestra atención en un cristal previamente seleccionado, tras varios rebobinados de la secuencia, y seleccionamos diferentes instantes de la secuencia de cristalización. Con las imágenes seleccionadas se procedió a la captura de pantalla, pegado en un documento de Microsoft Word y guardado en formato PDF. Para el análisis de las imágenes y medida de las dimensiones del cristal que consideramos convenientes, abrimos el programa GIMP 2.8.16,^[3] seleccionamos e importamos cada una de las imágenes en formato PDF guardada y anotamos la resolución de la imagen. Tras ampliar la imagen (normalmente 200%) se midió el cristal seleccionado mediante la herramienta «Herramienta de medida: medir distancias y ángulos» que se encuentra dentro de la pestaña «Herramientas» de la barra superior del programa. Para que el resultado de la medida sea visible en la pantalla, seleccionamos la pestaña correspondiente a «Usar la ventana de información». La imagen es ampliada una vez más (normalmente 400%) para verificar que los puntos inicial y final de la dimensión medida son adecuados. De lo contrario son corregidos, y el valor de la medida realizada en píxeles, registrada. Este protocolo de opera-

ciones se realiza con todas las imágenes seleccionadas de las dos secuencias de cristalización grabadas.

Conversión de píxeles (px) a centímetros (cm)

Las medidas realizadas permiten obtener los valores de longitud de las dimensiones objeto de estudio, tomando el píxel como unidad básica de medida de la imagen digitalizada en pantalla. Para su conversión a unidades de longitud convencionales (cm) se emplea una ecuación que requiere utilizar la resolución de la imagen.

$$L(\text{cm}) = [l(\text{px}) \div R(\text{ppp})] \times 2,54 \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde,

L (cm): longitud calculada en centímetros.

l (px): longitud medida sobre la imagen en píxeles.

R (ppp): resolución de la imagen en píxeles/pulgada.

2,54: factor de conversión entre pulgadas y centímetros.

Cálculo de la escala

Un alfiler de grosor conocido (0,60 mm) se somete a igual proceso de grabación, captura de imagen, medida y conversión a unidades de longitud convencionales que el utilizado para las imágenes de los cristales. El valor final obtenido (6,4 mm) permite calcular la escala (Ecuación 2) y obtener los valores reales de longitud de nuestros cristales, expresados en milímetros.

$$\text{Esc.: } L_{\text{dibujado}}/L_{\text{real}} = 10,668/1 \quad (\text{ecuación 2})$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las dos secuencias de cristalización grabadas comenzaron a registrar imágenes sobre las que pudimos realizar medidas en aproximadamente el mismo instante de tiempo, por lo que las imágenes y datos obtenidos en ambas secuencias fueron comparables. Se observa un diferente patrón de crecimiento dependiendo de la fecha de grabación de la secuencia de cristalización, tanto en tamaño como en velocidad de crecimiento.

Los valores experimentales reales de longitud de cristal (mm) versus el tiempo de captura (minutos) fueron representados mediante una gráfica de puntos del programa SigmaPlot® 12.0 para Windows®.^[2] Las gráficas fueron ajustadas a la función más adecuada en cada caso. La coherencia del ajuste fue valorado con el valor de R². La velocidad inicial de crecimiento real de los cristales se calculó a partir de la pendiente del tramo recto inicial, por ajuste de los datos correspondientes a la ecuación de la recta más adecuada.

Para cristales grabados en julio de 2016 (período de cristalización) se encuentra un patrón similar al descrito

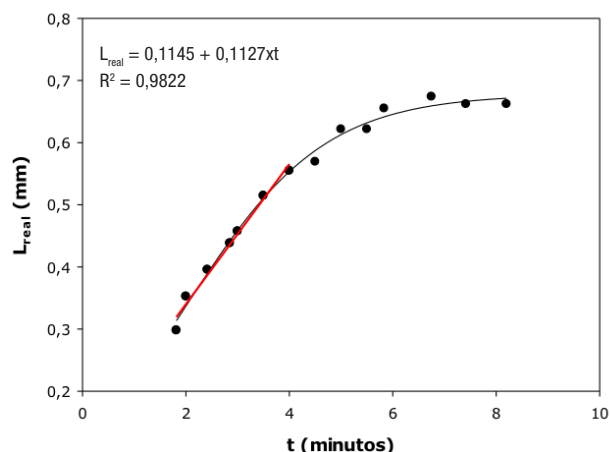


Figura 1. Velocidad inicial de crecimiento real de cristales de NaCl. Representación de la longitud real de los cristales (L_{real}, mm) frente al tiempo de cristalización (t, minutos). Datos obtenidos en fecha 4 de julio de 2016: período de cristalización de la sal marina

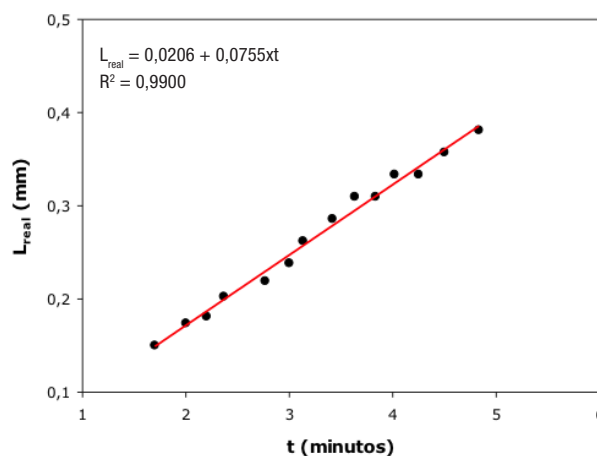


Figura 2. Velocidad inicial de crecimiento real de cristales de NaCl. Representación de la longitud real de los cristales (L_{real}, mm) frente al tiempo de cristalización (t, minutos). Datos obtenidos en fecha 29 de septiembre de 2016: campaña de extracción de la sal marina

en trabajos anteriores.^[1] La velocidad de crecimiento aumenta de forma lineal hasta un instante (4,5 minutos) en que la velocidad disminuye y muestra una cinética de saturación (Figura 1).

Para cristales grabados a finales de septiembre (campaña de extracción) sólo fue posible registrar el tramo recto de crecimiento inicial (Figura 2).

La velocidad de los cristales grabados a principios de julio ($v_0 = 112,7 \pm 6,8 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$) fue 1,5 veces superior que la de los cristales grabados a finales de septiembre ($v_0 = 75,5 \pm 2,2 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$), con errores de cálculo dentro de un rango permitido. El cálculo de la velocidad de crecimiento en cristales obtenidos a principios de julio mostró un coeficiente de variación (CV, %) del 6,0%, mientras que en cristales obtenidos a finales de septiembre fue sólo de un 2,9 %. Esto supone un cambio significativo en la velocidad de crecimiento de los cristales de NaCl sujeto a la estacionalidad. Las temperaturas registradas en las fechas en que

se realizaron las grabaciones no muestran grandes diferencias. El cuatro de julio se registró una temperatura de 29 °C y el veintinueve de septiembre dos grados centígrados menos, 27 °C.^[11] Otros factores como humedad relativa, número de horas de luz solar e intensidad de la misma, asociados a la estación del año en la que nos encontremos, afectan claramente de forma significativa al proceso estudiado. Durante el fin de semana del 22 y 23 de octubre de 2016, llovió de forma abundante en Alcobendas. La temperatura era baja (15-17 °C) y la humedad relativa elevada e imposibilitaba la evaporación del agua de la muestra y la cristalización de la sal. Las precipitaciones acumuladas este fin de semana alcanzaron 15 mm,^[11] un 5 % de lo que normalmente se acumula a lo largo de todo el año en San Pedro del Pinatar (≤ 300 mm).^[7] Nos encontrábamos fuera del período de cristalización de la sal marina que finalizó el doce de septiembre de 2016 y este proceso resultaba imposible. En estas condiciones se requiere de un proceso de evaporación inducida para la obtención de los cristales de NaCl.^[10]

Para los cristales de NaCl no se observa un comportamiento sigmoideal al inicio del proceso como el descrito para las moléculas de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,^[11] de mayor tamaño y complejidad estructural. Además, la velocidad de crecimiento para NaCl fue entre 2,4 y 3,6 veces mayor que la medida para los cristales de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ la cual osciló entre $v_0 = 29,3 \pm 2,1$ y $v_0 = 33,6 \pm 2,3 \mu\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. El menor tamaño de la red cristalina de NaCl y su menor complejidad estructural permiten una mayor velocidad de crecimiento de los cristales así como la no observación de un período de retardo o lag en el inicio de la formación de los cristales que caracterizó el inicio sigmoideal del patrón de crecimiento en cristales de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

Los resultados obtenidos fueron expuestos a don Julio Francisco Fernández Ramos, director de Salinera Española, S. A., quien los corrobora por su coherencia con su experiencia práctica en la extracción de esta sal en sus instalaciones de San Pedro del Pinatar. Durante los meses de junio, julio y agosto se produce la fase de cristalización y precipitación de NaCl, para a primeros de septiembre iniciar la campaña de extracción de la sal formada. La campaña de extracción de sal 2016, que se inició el doce de septiembre y finalizó el once de noviembre, supuso un total de cuarenta y dos días laborales y una extracción de 99952 toneladas de sal (Datos suministrados por Salinera Española, S.A.). A partir del doce de septiembre la cristalización de NaCl no es representativa o se produce a una velocidad que no resulta rentable para la empresa. El aumento en la producción de NaCl que obtendrían por alargar el período de cristalización hasta más avanzado el mes de septiembre no compensaría las pérdidas que se producirían si se vieran obligados a adelantar el fin de la campaña de explotación de sal por la implantación de unas condiciones climatológicas desfavorables propias de la estación otoñal en la que nos encontraríamos. Todo esto suma un conjunto de factores difíciles de conjugar y por tanto de planificar,^[5,8] por lo que sería necesario realizar nuevos estudios para facilitar la toma de decisiones en este aspecto tan relevante para la empresa Salinera Española, S.A. En la actualidad, la plani-

ficación que se realiza se basa en parámetros físicos de la medida del espesor de la capa formada de NaCl y en las previsiones meteorológicas de las que se dispone para la campaña de extracción,^[7] pero no de parámetros cinéticos de velocidad de formación de cristales de esta sal, que es la base de nuestro trabajo y proporcionarían una idea real de su estado de cristalización.

CONCLUSIONES

Apenas hay experiencias publicadas de este proceso industrial ancestral^[6,7,12,13] que aporten datos cuantitativos como los que se citan en este estudio.

Los distintos estándares de aprendizaje con los que se pretenden alcanzar las competencias básicas reguladas en la normativa educativa en vigor, desde las áreas que integran el currículo de Ciencias en ESO y Bachillerato, surgen de manera lógica, integrada y coordinada, y posibilitan alcanzar los resultados que aquí se exponen.

Explicamos las diferencias de cristalización observadas para NaCl dependiendo de la fecha en que se grabó la secuencia de cristalización, la imposibilidad para la formación cristales a finales de octubre y aportamos valores cuantitativos que ilustran tales diferencias. Utilizamos un trabajo anterior^[11] para solucionar un nuevo problema. Mejoramos la metodología de estudio del proceso de cristalización así como la precisión y exactitud de los resultados obtenidos con la introducción de nuevos programas informáticos para el procesado de imagen y medida, obteniendo unas conclusiones más fiables. Los resultados, claros e inequívocos, permiten validar y consolidar el método de trabajo propuesto.

Los resultados de este trabajo permiten abrir la posibilidad de iniciar una investigación que se desarrollaría a pie de las lagunas denominadas cristalizadores, con la finalidad de estudiar la evolución de la velocidad de crecimiento de los cristales de NaCl a lo largo del período de cristalización (junio-agosto) con el objetivo de optimizar el final de dicha fase y el inicio de la campaña de explotación de la sal formada. Esto permitiría reducir y optimizar los gastos de personal, maquinaria y fuentes de energía^[7] derivados de una cristalización más larga de lo necesario y evitaría las pérdidas que se producirían, en años en que la campaña de extracción se ha iniciado demasiado tarde, por un adelanto del final de dicha extracción debido a la implantación de unas condiciones climatológicas desfavorables propias de la estación otoñal, que aunque no es habitual que se produzca, suelen darse de forma cíclica en esta región del litoral mediterráneo.

AGRADECIMIENTOS

A mis alumnos y alumnas S. Alcaraz-Gómez, O. S. Balan, C. Bouhou, M.^a I. Egea-Cegarra, A. Escudero-Albaladejo, V. Gálvez-Martínez, L. I. M. Hardoi, D. P. Japón-Llivipuma, G. Rabal-López, A. Rodríguez-Cifuentes, E. Sánchez-Gómez, a mis compañeros de trabajo que han contribuido

a su formación, al equipo directivo del IES Dos Mares por facilitar nuestra tarea en todas aquellas cuestiones solicitadas, y en especial a su directora doña M.^a J. Cantos del Viejo que activamente ha contribuido para que este trabajo pudiera materializarse con éxito. Al Excmo. Ayuntamiento de San Pedro del Pinatar (Murcia), a Salinera Española S. A. y a la Fundación Cajamurcia por su generoso apoyo a nuestra labor docente.

«A Marta, la sangre que me da la vida, y a Ruth, el corazón que la bombea».

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Rojas-Melgarejo. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$: Génesis Celeste. III concurso «La química en mi entorno», convocado por la RSEQ-Sección Territorial de Murcia, 2015. Fecha de presentación 15 de enero de 2015. Premio: ACCESIT. <https://youtu.be/maNeGXN7rP8>.
- [2] Jandel Scientific. «SigmaPlot® 12.0 for Windows®». (Jandel Scientific, Ed.). Jandel Scientific: Corte Madera, 2011.
- [3] GIMP 2.8.16 (GNU Image Manipulation Program) Programa de edición de imágenes digitales. Licencia pública general de GNU, 2015.
- [4] R. P. Multhauf. *Neptune's gift, a history of common salt*. Johns Hopkins University Press, 1978. ISBN 08-018-19555.
- [5] J. F. Fernández-Ramos y J. Cifuentes-Rodríguez. *Explotación de unas salinas marítimas*. Fondos bibliográficos de Salinera Española, S. A., 2013.
- [6] Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente. *Salinas de Andalucía*, 2004. ISBN: 84-96329-23-2.
- [7] G. A. Ballesteros-Peigrín y J. F. Fernández-Ramos. La explotación industrial de las salinas de San Pedro Del Pinatar (Murcia). *Papeles de Geografía* 2013, 57-58, 55-68.
- [8] Salinera Española, S. A. Proceso de obtención de sal a partir de agua del mar extracción de sal marina. Fondos bibliográficos de Salinera Española, S.A., 2007.
- [9] K. F. Kiple y K. Coneè-Ornelas. *The Cambridge World History of Food*, Cambridge University Press, vol. 1 (IV.B.7. «Sodium», Thomas Wilson & Clarence E. Grim), 2000.
- [10] ISAL. La sal que nutre y alimenta, 2013. www.institutodelasal.com
- [11] AccuWeather®, Inc., 2017. <http://www.accuweather.com>
- [12] O. Weller. Los orígenes de la producción de sal: evidencias, funciones y valor en el Neolítico europeo. *PYRENAE* 2004, 35 (1), 93-116.
- [13] R. Mellado-Pérez. Las salinas marítimas de San Pedro del Pinatar. *Revista Murciana de Antropología* 2007, 14, 481-514.

¿Quieres ser socio de una de las
sociedades científicas más
importantes de España?



Si tienes menos
de 25 años,
hazte socio de la
RSEQ por 5 EUR

RSEQ
Real Sociedad Española de Química
www.rseq.org