

CAPÍTULO IV

Un laboratorio de la complejidad en nuestra mochila. Autoorganización, cooperatividad y adaptabilidad

Adrián Arturo Huerta Hernández
Melissa Yaeth Paredes Cabrera
Angélica Piedad García Benítez

Resumen

Utilizando un enfoque didáctico se analizan propuestas experimentales de bajo costo que lleven experiencias significativas a los estudiantes tanto dentro como fuera de las aulas. Lo anterior tiene como objetivo detonar su interés por el estudio de la complejidad y los fenómenos colectivos, ilustrando conceptos como la autoorganización, la cooperatividad y/o la adaptabilidad, empleando para ello los llamados laboratorios “portables”. En este contexto se plantea la mejora de la participación de nuestro grupo de divulgación en las actividades de las Jornadas Nacionales de Física de la Sociedad Mexicana de Física del año 2025 (Sociedad Mexicana de Física [SMF], 2025). En donde se introduce y enfatiza el uso de dichos conceptos (autoorganización, cooperatividad y/o adaptabilidad) mencionados en los sistemas complejos, interpretándolos como valores que deben explorarse en las sociedades, debido a la crisis de valores en que vivimos, comparando en otros contextos como en la ecología y otros fenómenos colectivos que nos aquejan. Además, se plantea la posibilidad de que en el futuro las actividades puedan usarse como proyectos integradores o proyectos de aula en la educación multigrado. Enfatizando el hecho que todas estas propuestas se pueden mejorar con otras áreas con objeto de fomentar su curiosidad, autonomía, confianza, pensamiento crítico, cooperatividad, autodidactismo y mostrando que, aunque con muchos avances, la ciencia y la tecnología no se encuentran terminadas, haciendo falta mucho por investigar, aprender y aplicar en nuestra vida diaria.

Palabras clave: Sistemas complejos, fenómenos colectivos, autoorganización, cooperatividad, adaptabilidad.

Abstract

Using a didactic approach, low-cost experimental proposals are analyzed to provide meaningful experiences for students both inside and outside the classroom. The goal is to ignite their interest in the study of complexity and collective phenomena, illustrating concepts such as self-organization, cooperativity, and adaptability through the use of “portable” laboratories. In this context, we plan an improvement of the activities that will be presented by our dissemination group at the National Physics Sessions of the Mexican Physics Society in 2025. The usage of the complex systems concepts (self-organization, cooperativity, and adaptability) will be introduced and emphasized as values to be explored in nowadays societies, due to the current crisis of values, comparing with other contexts such as ecology and other collective phenomena that concern us. Moreover, the possibility of the activities being used as capstone projects or multi grade classroom projects is presented. Each proposed activity could be enhanced by contributions from other areas in order to foster curiosity, autonomy, confidence, critical thinking, cooperativity, autodidacticism and show that, despite numerous breakthroughs, science and technology are not done yet and there is so much left to research, learn and apply in our daily life.

Keywords: Complex systems, collective phenomena, self-organization, cooperativity, adaptability

Introducción

En el presente capítulo se discute la propuesta de actividades que se presentaron en el 1er Congreso Internacional: Cultura Escolar, Práctica Docente y Procesos Educativos en la ponencia: “Un laboratorio de la complejidad en nuestra mochila” con la idea de replantear las actividades del grupo de divulgación: Laboratorio de Materiales Blandos “Portable” activo desde 2019 (Peralta, 2019), el cual permitió continuar actividades durante la pandemia de Covid19 (Universidad Veracruzana [UV], 2020), y fortalecer el trabajo remoto (Huerta, Hernández y Sampieri, 2023, 177-198). Por otra parte, responde a la necesidad de incluir valores y actitudes que promueve la Universidad Veracruzana (UV, 1999), a través del eje axiológico, el cual busca que la educación de los estudiantes se centre en los valores humanos y sociales, el aprendizaje teórico (eje teórico) y

práctico (eje heurístico), y la aplicación de este tipo de conceptos que, se considera, pueden ser detonantes del incremento de dichos valores.

Basado en lo anterior, buscamos la posibilidad de hacer analogías, modelos, simulaciones e incluso el estudio de casos que se puedan llevar a cabo de manera inter o multidisciplinaria. Por lo que puede tener impacto en los proyectos de aula y/o proyectos integradores de la Nueva Escuela entre otros modelos como el de ciencia, tecnologías y sociedades, así como en la tendencia STEAM (Catalá Rodes, García Franco y Chamizo, 2024, 124-146). Al escanear el código QR se redirige a una lista de reproducción en la plataforma YouTube que contiene los videos de las Jornadas Nacionales de Física del 2024, así como videos adicionales sobre cada tema.

Videos en el QR: *Mochila de la Complejidad*



1. Fractales y cristalización por evaporación (11-abril-2024).
2. Microscopio "Gotita de agua" (22-feb-2024).
3. Paisajes de energía con bolitas de hidrogel (12-diciembre-2024).
4. "El baile de las moléculas" (20-junio-2024).
5. ¿Qué es la difusión? | Experimento (27-agosto-2020)
6. SOC Modelos Granulares y Palomitas (22-agosto-2024).
7. Gelatinas y un calorímetro (10-octubre-2024).

En lo siguiente se menciona cómo se incluyen en las actividades del presente año 2025 los conceptos de autoorganización, adaptabilidad y cooperatividad provenientes de los sistemas complejos del proyecto la mochila de la complejidad que se presentará en las fechas indicadas. Se desarrollan a detalle las primeras dos actividades, las cuales se planearon para su realización en las Jornadas Nacionales de Física 2024, sin embargo, a comparación de este año, en esa ocasión no se exploraron a profundidad los conceptos de los fenómenos colectivos mencionados (como puede verse en los videos de las Jornadas que se encuentran en el código Qr). En lo que concierne a las actividades 3 a la 6, ya han sido realizadas en eventos anteriores, algunas ya han sido publicadas y contienen la lista de materiales necesarios, el cual se indicará en cada caso. Otras se encuentran en proceso, por lo que sólo se comenta su relación con los conceptos de autoorganización, cooperatividad y/o adaptabilidad, el cual es objetivo del presente texto y se incluye la referencia para ampliar su información.

Desarrollo

Los sistemas complejos y sus fenómenos colectivos

Una característica transversal tanto en las ciencias sociales como en las ciencias naturales es que muchos fenómenos de interés, que ocurren a diferentes escalas en sistemas de diferente naturaleza, están compuestos por unidades fundamentales. Por ejemplo, las sociedades están conformadas por personas, animales o incluso microorganismos; los bosques, parques o jardines están compuestos por árboles, flores o plantas que interactúan entre sí de diversas maneras. Esta es la escala que conocemos y en la que nos desenvolvemos comúnmente. Sin embargo, podemos pensar en otro tipo de escalas donde existen sistemas mucho más pequeños que nosotros o, por el contrario, mucho más grandes que nosotros mismos. Un ejemplo son los órganos que nos componen, están formados por células de distintos tipos que aportan las características necesarias para el correcto funcionamiento de cada órgano. O bien, escalas del orden de la distancia, digamos entre el sol y la tierra, nuestro planeta.

En este contexto se encuentran también las escalas temporales que involucran diferentes fenómenos colectivos que pueden ocurrir tanto en tiempos muy pequeños, digamos más rápido que un segundo, como en fenómenos que ocurren en nuestras escalas de tiempo, como los cambios del día a la noche, los cambios de las estaciones del año primavera, verano, otoño e invierno, o los procesos de acreción de planetarios (Benet, 2013, 111-113), u otros como la estabilidad de nuestro sistema solar (Benet, 2012, 36-37), cuya duración excede la vida humana. Por eso ha sido importante dejar memoria de los acontecimientos astronómicos, entre otros, que han observado las diferentes civilizaciones que han habitado nuestro planeta y que ahora con los telescopios espaciales adquieren otra dimensión en cuanto a posibilidades de estudio, (*Telescopio Espacial James Webb*, s.f.). De ahí que el estudio de la astronomía, la biología o microbiología, la química o la física tenga lugar en diferentes contextos de escalas o tamaños que podemos usar como referencia para darnos una idea de la impresionante variedad de tamaños de las cosas y los tiempos en los que ocurren los procesos que nos rodean.

En el caso de la materia, ya sea orgánica o inorgánica, y a una escala

mucho menor, están compuestas por átomos y moléculas que no pueden observarse a simple vista ni con los microscopios ópticos comunes de los laboratorios. Un proceso análogo sucede en la economía o en las sociedades, donde las unidades fundamentales están representadas por el dinero o por las personas, animales u organismos que las componen, respectivamente. Generando comportamientos análogos a los observados en otros sistemas compuestos por múltiples partículas (como son los líquidos, los sistemas ecológicos, poblaciones, etcétera). Originando así nuevas áreas de oportunidad para el estudio de los fenómenos complejos emergentes como en las áreas llamadas: *sociofísica*, la cual se encuentra enfocada en los fenómenos de carácter social, (Rodríguez, 2018, p.5), o la *econofísica* enfocada en los fenómenos económicos (Leyva Rayón, 2019).

Fenómenos emergentes

Curiosamente, aunque su naturaleza sea distinta, gracias a las interacciones entre las unidades que los conforman, ya sea una sociedad, una economía o un estado de la materia, surgen de manera natural diferentes estados o *fenómenos emergentes*. Estos fenómenos son propios del conjunto de unidades, pero no tienen sentido de manera aislada. Por ejemplo, una persona aislada no forma una sociedad; muchas personas aisladas tampoco la forman. De igual manera, células aisladas no conforman un tejido u órgano, y átomos o moléculas aisladas no constituyen un estado de la materia. De esta forma, el estudio de los sistemas complejos se enfoca en los *fenómenos colectivos* que *emergen* de las interacciones entre todas las unidades que los componen, en contraste con el reduccionismo, que suele estudiar las unidades de manera aislada o las considera de manera promedio (aproximación de campo medio, por ejemplo). De esta forma podemos hablar de las moléculas de agua de manera aislada pero no podemos decir si esa molécula se encuentra en un estado líquido, sólido o gaseoso, porque no tiene sentido hablar sobre los estados en los que se encuentra una molécula de agua aislada, para que lo anterior tenga sentido debemos considerar un número mucho mayor ¹, algo similar ocurre en las sociedades, cultivos y economías.

¹ Al menos un mol de materia i.e. 10^{23} , (Carmona, 2007).

La mochila de la complejidad

Debido a que muchos de estos fenómenos son de interés para diversas áreas del conocimiento, es posible encontrar ejemplos didácticos que permiten explicar conceptos como la autoorganización, la cooperatividad o la adaptabilidad. Además, estos ejemplos pueden integrarse en las aulas como estrategias de enseñanza-aprendizaje mediante los llamados laboratorios “portables”. En este contexto, proponemos la Mochila de la complejidad, que incluye experimentos de bajo costo diseñados para proporcionar experiencias significativas que ilustren dichos conceptos. Con esta propuesta también buscamos preparar a los estudiantes para comprender conceptos más avanzados relacionados con la fractalidad, los fenómenos de autoorganización, la cooperatividad, la colectividad y la adaptabilidad en sistemas complejos reales. Razón por la que podrían ser considerados como proyectos de aula.

Asimismo, se pretende documentar la efectividad del aprendizaje a través de proyectos de investigación en el aula (por medio de los proyectos integradores), en casa o en campo, aprovechando la portabilidad y accesibilidad de estos laboratorios. Así como para el aprendizaje autodidacta, o de inclusión multigrado, en contextos tales como la pandemia u otros casos como las discapacidades, (Huerta, Hernández, García y Silva, 2025). Cualquier contenedor para almacenar y transportar el material necesario para las prácticas, será el hogar de nuestro laboratorio portable para realizar actividades que ilustren los conceptos mencionados. A continuación, se presentan ejemplos de dinámicas para explorar nuestro entorno con material accesible.

Propuesta de Taller: *Un laboratorio de la complejidad en nuestra mochila*

Grupo de divulgación: *Laboratorio de Materiales Blandos ‘Portable’*

Proyecto: *La mochila de la complejidad*

Coordinador: *Adrián Huerta*

Talleristas: *Angélica Piedad García Benítez - Melissa Yaeth Paredes Cabrera.*

Con esta propuesta pretendemos introducir a los participantes de los talleres a la observación de fenómenos que comúnmente ocurren a nuestro alrededor y con los cuales estamos familiarizados en nuestra

escala de espacio y tiempo, tratando de identificar con nuestros propios sentidos sus diferentes características, de tal manera que observaciones que podamos ver con nuestros propios ojos, escuchar con nuestros propios oídos, sentir a través de nuestra piel den evidencia de lo que está ocurriendo a nuestro alrededor, con la consecuente curiosidad de buscar nuestras propias explicaciones de aquello que se está observando.

Por ejemplo, observar los cambios de temperatura del día a la noche, o en periodos más largos como los cambios de estaciones. Las diferencias con los cambios de temperatura debido a las nubes o el cielo despejado a lo largo del año, los cambios de presión relacionados con la altura, entre muchos otros (Cruz, Zermeño y Huerta, 2025). Todo lo anterior visto en nuestra escala de tiempo y espacio, tiene claramente una contraparte en la escala microscópica, digamos en la escala celular o más pequeña en la escala atómico-molecular, la cual es prácticamente inaccesible a nuestros sentidos, por lo que para observar qué es lo que ocurre en esas escalas será necesario el uso de herramientas o aparatos que nos permitan observar en esas escalas, así como también el uso de otro tipo de sensores, como los pueden tener los microscopios, las cámaras y celulares, o bien para registrar sonidos como las grabadoras, termómetros u otros sensores. Los cuales no sólo amplían nuestros propios sentidos, sino también registran y nos permiten hacer mediciones. Con los cuales será posible cuantificar diferentes propiedades y buscar relaciones entre ellas, lo cual nos conducirá a las diferentes leyes de la naturaleza. De esta manera se pueden introducir las cámaras, grabadoras y otros sensores de los teléfonos celulares que actualmente se encuentran al alcance de muchos, a nuestra mochila de la complejidad.

Actividad 1: De lo macro a lo micro. "El planetario portable y el microscopio gotita de agua". (13 de febrero, 2025).

¿Alguna vez has notado lo mucho que le gusta a la naturaleza el replicar patrones? Por ejemplo, los ríos que llevan agua y nutrientes a través de nuestro planeta son muy parecidos a nuestras venas, o su forma similar a las ramas de los árboles. Todos son de diferentes tamaños, pero mantienen una forma y función bastante parecidas. Algo así sucede con los fractales. Estos son objetos o estructuras que se caracterizan por repetir un patrón básico a diferentes escalas, creando formas que parecen iguales sin importar el nivel de ampliación ("zoom") que usemos.

La fractalidad es clave para entender muchos fenómenos naturales y también encuentra aplicaciones en la tecnología, las artes y las ciencias sociales. La naturaleza nos muestra así su preferencia por la eficiencia y la belleza en los diseños.

Así como a la naturaleza le gusta replicar patrones, los seres humanos hemos aprendido a imitarla, como los edificios de departamentos son análogos a las colmenas, o las estructuras de los aviones son a los esqueletos de algunas ballenas. Descubrimos que muchas veces lo mejor que podemos hacer para mejorar algo es observando lo que nos rodea, replicándolo, a veces a un tamaño más grande o más pequeño. Entender cómo funciona algo nos lleva a una mejor comprensión de lo que nos rodea, por algo podemos disfrutar de libros llenos de ilustraciones coloridas durante nuestros años como estudiantes de educación básica. Las modelos nos ayudan a imaginar aquello que no podemos ver a simple vista, que no son tangibles o que no podemos presenciar desde una distancia segura, sobre todo si el objeto de nuestro interés se encuentra a *escala*.

En general *adaptamos* nuestras ideas y entornos a nuestras necesidades. Lo mismo sucede cuando estudiamos, debemos hacer uso de lo que sabemos y lo que tenemos para llegar a lo que queremos saber. Cuando nuestro objetivo involucra infantes que muchas veces tienen mucha energía, una gran curiosidad y gran entusiasmo por ver, tocar y cuestionarlo todo, la situación se torna bastante interesante. Podemos poner a los niños frente a una pantalla de cualquier tipo o dimensión para que observen alguna simulación que les explique nuestro lugar en el universo, lo cual no es muy diferente a ir a clases o dejarlos entretenidos viendo programas educativos, pero ¿qué hay de la opción de ponerlos a buscar objetos de diferentes tamaños y colores para representar algo? Con la siguiente actividad pretendemos involucrar a los estudiantes de cualquier entorno y con cualquier presupuesto a trabajar en un reto que les motive y resulte agradable para comprender nuestro trocito de universo cercano: el Sistema Solar.

El Mundo Macroscópico: construcción de un modelo planetario portable

Construir modelos puede ser una buena herramienta para aprender.

Con ellos podemos representar sistemas o fenómenos naturales que no podemos observar directamente. Nuestro Planetario Portable nos permite imaginar y comparar los planetas de nuestro Sistema Solar. Además de que proponemos que cualquier persona pueda construir su propio modelo con materiales económicos, accesibles y hasta reciclados.

Por el tamaño de nuestro Sistema Solar podemos encontrarnos con dos problemas principales: La necesidad de un espacio amplio para la construcción del modelo o planetas riesgosamente pequeños. Debido a ello tuvimos que hacer algunos ajustes y decidimos comenzar con el objeto cotidiano al que llamamos sombrilla (o paraguas, dependiendo del clima), ya que era una forma práctica de transportar y desplegar una representación del espacio que conforma nuestro sistema y esperábamos que los niños pudieran visualizar tanto las diferencias de tamaño entre los planetas como sus movimientos alrededor del sol (recomendamos hacer la aclaración de las diferencias entre movimiento circular y el elíptico en las órbitas). La propuesta busca complementar algunos contenidos de los libros de textos para niños de 6 a 12 años en las aulas, pero con la posibilidad de trabajarlo no sólo en la escuela sino también en sus hogares con familiares o tutores, conocimiento al alcance de todos, ver figura 1.

Reto 1: Construcción de un modelo planetario portable usando una sombrilla.

Material a la mochila: Sombrilla/paraguas, esferas de distintos tamaños, cuentas de colores, hilo, aguja y materiales para caracterizar los planetas (fibras blandas, arcilla, diamantina, pegamento, etcétera).

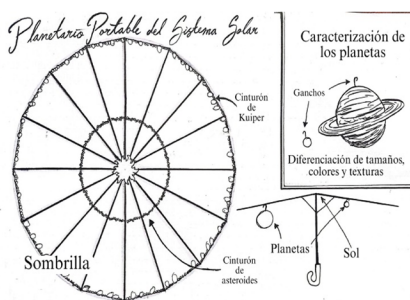


Figura 1: Esquema del modelo planetario portable construido con material de bajo costo o reciclado. Enfatizando la importancia de usar un modelo para entender los conceptos como el tamaño de los planetas a escala, orden con referencia al sol, episodios históricos o la comprensión misma de cómo funciona nuestro propio sistema solar.

El modelo del Sistema Solar del Planetario Portable se diseñó con un enfoque didáctico y sensorial, permitiendo a los niños explorar conceptos científicos de manera intuitiva. Cada planeta se elaboró con materiales accesibles, de bajo costo y con características específicas para representar sus características principales.

Los planetas gaseosos, como Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, están fabricados con fibras suaves, lo que enfatiza su composición ligera y su atmósfera extensa. En contraste, los planetas rocosos, como Mercurio, Venus, Tierra y Marte, están moldeados en arcilla dura, reflejando su superficie sólida y compacta. Al reunir los materiales necesarios, surgió un desafío al construir un prototipo del Sistema Solar. La sombrilla utilizada no permitía representar adecuadamente las distancias planetarias, y el tamaño reducido de algunos planetas implicaba un riesgo de asfixia para los niños al manipularlos, por lo que se decidió ajustar el diámetro de Júpiter a una esfera de 20 cm de diámetro. El diseño de colores también sigue principios científicos que consideramos son importantes de tener en consideración al momento de caracterizar cada planeta y señalar a los estudiantes, además de la medida fue escalada mediante el factor de escalamiento $20 \text{ cm} / 142,984 \text{ km}$, correspondiente a los 20 cm deseados y el diámetro real de Júpiter (esto es 142,984 km) con objeto de calcular proporcionalmente los diámetros de todos los planetas *escalados* mediante ese factor en centímetros, el diámetro real multiplicado por el factor de escalamiento, obteniéndose el diámetro escalado, i.e. nombre del planeta (diámetro real por factor de escalamiento = diámetro escalado en cm). No obstante, si no se cuenta con una esfera de 20 cm se puede usar otra de diferente diámetro, reemplazando los 20 cm por el diámetro en cm de la esfera más grande con la que se cuente.

Preguntas formativas que podrían ser aplicadas durante la construcción o aplicación del modelo del Planetario Portable para mantener la dinámica en la clase: ¿Por qué es necesario usar un factor de escalamiento al representar el Sistema Solar en un modelo físico?; Si quisieras hacer un modelo con una esfera de Júpiter de 30 cm en lugar de 20 cm, ¿cómo calcularías el nuevo factor de escalamiento para los demás planetas?; ¿Cómo influyó la elección de materiales en la organización del modelo y en la representación de las diferencias entre los planetas gaseosos y rocosos? ¿Se les ocurre alguna otra forma de *adaptar* su modelo?

Para preparar nuestra sombrilla la pintamos de negro porque originalmente era azul y cosimos las cuentas de colores para representar el cinturón de asteroides en el interior, y el cinturón de Kuiper en el borde de la sombrilla, en nuestro caso decidimos usar colores diferentes para caracterizarlos. Colocamos ganchillos en el interior de la tela de sombrilla y por último la decoramos con pintura y diamantinas. La representación de los tamaños y el orden de los planetas respeta su disposición en el Sistema Solar, favoreciendo la comprensión de la *autoorganización* natural de los cuerpos celestes.

Este modelo también refleja la importancia de la *adaptabilidad*, ya que su diseño permite la manipulación y exploración táctil, facilitando distintos enfoques educativos según la edad y el nivel de conocimiento de los niños. Con esta combinación de materiales, colores y disposiciones, el Planetario Portable se convierte en una herramienta educativa innovadora que acerca la astronomía a los niños mediante la experiencia sensorial, importante en los casos de inclusión o discapacidad. Otro punto importante es que hasta donde tenemos entendido la vida como la conocemos sólo se presenta en nuestro planeta y es necesario *cooperar* para mantenerla, *adaptarnos* y prepararnos para el futuro que les espera a las siguientes generaciones, como pueden ser los cambios climáticos, tipo de alimentación, migraciones, entre muchos otros, para lo cual es necesario aprender o reaprender a trabajar de manera *colectiva*, cooperativa y empática. Más información sobre su aplicación en un entorno de *inclusión* se puede encontrar en el capítulo de Huerta et al. (2025).

Mundo Microscópico: Crecimiento de cristales por evaporación de agua con sal observados con un microscopio portable, el microscopio "gotita de agua".

Otra de las actividades que podemos llevar a cabo tanto dentro como fuera de las aulas es la observación de la formación de cristales de sal diluida en agua al evaporarse a diferentes velocidades, ver Vídeo 1 en la lista de reproducción del QR de la página 3. Debido a la evaporación la concentración de los iones de Cl^- de Na^+ aumenta hasta la saturación ocasionando la precipitación de cristales de NaCl (sal) los cuales, si son depositados en un portaobjetos de microscopio, vidrio u otra superficie, aparecerán de manera espontánea siendo factible observarse con ayuda

del microscopio portable como se muestra en nuestras experiencias anteriores realizadas en diferentes ferias de ciencias (Yañez y López, 2020). En la figura 2 se muestran estructuras fractales obtenidas evaporando agua con bicarbonato de sodio (izquierda) y un granito de sal obtenido de la misma forma, pero usando sal en vez de bicarbonato (derecha).

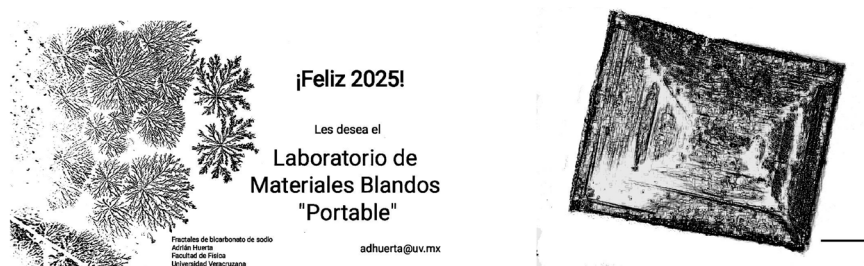


Figura 2: Estructura fractal obtenida por evaporación rápida de agua con bicarbonato de sodio, se observa la formación de cristales muy pequeños estructurados en formas fractales (izquierda); Estructura cristalina obtenida de la evaporación lenta de agua con sal, se observa la formación de los "granitos" de sal (derecha). La barra a la derecha indica la escala de 100 micras. Ambos obtenidos con un microscopio de juguete.

Reto 2: Microscopio "Gotita de agua":

Material a la mochila: Cartón, tijeras, portaobjetos, dispositivo con cámara, muestras para observar (frasco pequeño con agua, sal, azúcar, piel de cebolla, etcétera).

No siempre es fácil encontrar un microscopio, aunque sea de juguete, para lograr la inclusión de la mayoría de los participantes, en este punto se propone la construcción del microscopio portable que hemos llamado "gotita de agua" que ya hemos usado en ocasiones anteriores, ver Video 2 en la lista de reproducción del QR de la página 3. Con objeto de visualizar por ejemplo las diferencias entre las células de diferentes partes de una planta, como son sus raíces, sus hojas, etc., un ejemplo clásico es la observación de la epidermis de cebolla, e incluso la mitosis en el crecimiento de sus raíces. En otro contexto, observar la cristalización por evaporación de agua salada, agua con bicarbonato, o con azúcar, o bien observar las unidades (e. g. "gotitas de aceite") que conforman a una emulsión de la que hablaremos en la siguiente actividad "El baile de las moléculas" (Huerta, 2020a), ver figura 3.

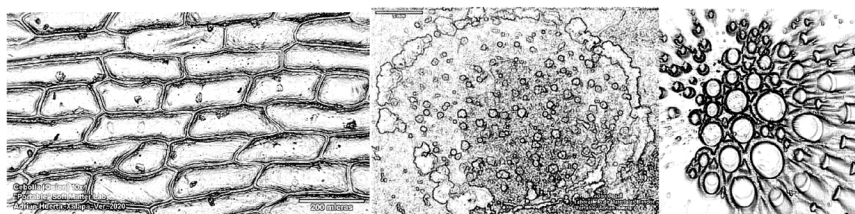


Figura 3: Células de epidermis de cebolla (izquierda); cristalización por evaporación de agua con sal (centro); emulsión de aceite en agua (derecha).

En estos casos podemos observar diferentes *fenómenos colectivos* que conducen a la formación de una estructura que se obtiene por la interacción entre la inmensa cantidad de partículas individuales, lo cual ocurre de manera *autoorganizada*. No obstante, la estructura final obtenida depende de la forma en que se obtuvo, e. g. velocidad de evaporación de una solución de agua con sal, pudiendo observar la formación de granitos de sal si la evaporación se hace lentamente (esto es en equilibrio), o bien, la formación de estructuras disipativas con apariencia fractal si la evaporación se hace de manera rápida, por ejemplo calentado cuidadosamente la superficie donde se estudiará la evaporación de la solución de agua con sal, este proceso debe ser monitoreado por el profesor o tutor responsable dependiendo de donde se realice la actividad. Más información se puede encontrar en la tesis de Urieta (2023).

Actividad 2: Autoorganización, adaptabilidad y cooperatividad. “Los paisajes de energía con bolitas de hidrogel” (10 de abril, 2025).

Material a la mochila: Recipientes de diferentes tamaños, esferas de hidrogel y agua.

Una de las actividades más frecuentes en nuestras tareas de investigación, docencia y divulgación consiste en observar cómo las esferas de hidrogel se expanden en el agua. Es un proceso bastante sencillo de preparar, no obstante, el desarrollo es tardado, por lo que contribuye a trabajar la paciencia, ver Video 3 en la lista de reproducción del QR de la página 3. Se puede iniciar observando el crecimiento de una sola bolita, familiarizarse con el comportamiento para posteriormente incrementar la cantidad

de esferas. El material para añadir a la mochila de la complejidad son esferas de hidrogel y recipientes translúcidos de diferentes diámetros. Para montar el experimento necesitaremos colocar una bolita de hidrogel deshidratada y verter agua en el recipiente hasta que la esfera esté sumergida. Una vez hecho esto, solo queda observar y esperar a que crezca. Luego, se puede investigar al respecto y tratar de entender lo que sucede a escalas menores al tamaño de la bolita, así como a escalas equivalentes y mayores conforme pasa el tiempo. Finalmente, podría observarse qué ocurre cuando se utilizan muchas bolitas, registrando el fenómeno con una cámara o un teléfono celular para analizar los patrones de autoorganización, ver figura 4.

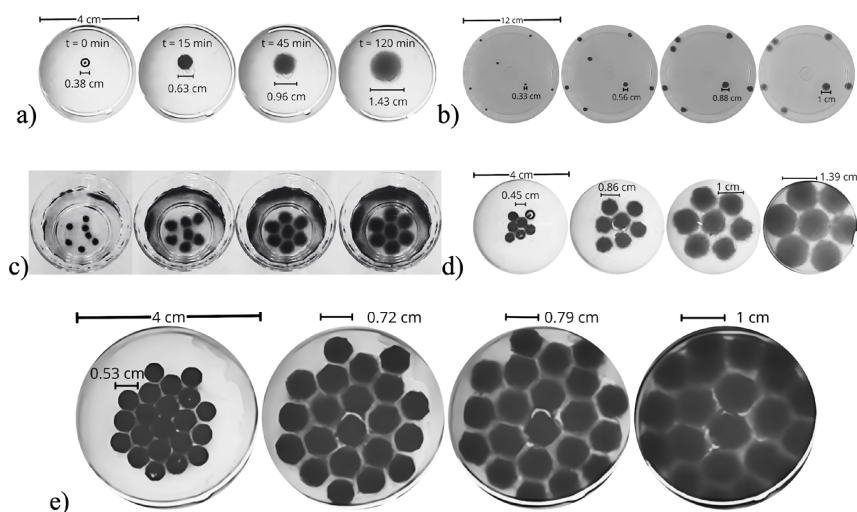


Figura 4: a) Ejemplos del crecimiento de una bolita de manera individual; b) Ejemplos del crecimiento de varias bolitas distribuidas en volúmenes o superficies mucho mayores y menores (esto es sin interacción); c)-e) corresponden a ejemplos de las bolitas de hidrogel creciendo dentro de un vaso de tal manera que al crecer logren estar en contacto (interacción); c) caso en que la superficie es más pequeña que la ocupada por las bolitas de hidrogel al crecer; d) caso en que ocupa justamente el mismo espacio y e) caso con un mayor número de bolitas interactuantes.

Al interactuar las bolitas se empujan unas a otras desplazando su centro de su lugar inicial, produciendo una reconfiguración y un reordenamiento. Grabando la evolución de este proceso con una cámara de video o tomando fotos cada cierto intervalo de tiempo es posible analizar el

fenómeno de reconfiguración y, si las bolitas son suficientes, es posible observar el proceso de *autoorganización* como en el caso de d) de la figura 4, que corresponde a 7 partículas en el fondo de un vaso.

Las partículas de hidrogel tienden comprimirse y almacenar energía (potencial), hasta llegar al grado de cambiar su configuración mediante este otro mecanismo de almacenamiento de energía el cual puede liberarse violentamente, ya sea cambiando su configuración a otra de menor energía dentro o fuera del plano que las contiene. De tal manera que el sistema se *adapta* al volumen disponible del recipiente que los contiene. En este ejemplo podemos ver que el crecimiento de las bolitas de hidrogel no modifica su configuración inicial hasta que las bolitas empiecen a interactuar, esto es durante el proceso inicial, el crecimiento será muy semejante al individual hasta alcanzar el punto en que al menos dos partículas entren en contacto entre ellas, o al menos una de ellas entre en contacto con el recipiente.

Otra posibilidad es que una de ellas esté en contacto con más de una partícula, o una partícula y una pared. Al seguir creciendo podemos darnos cuenta de que estas interacciones producen modificaciones *colectivas* de las configuraciones iniciales hasta llegar a un proceso de *adaptación* que requiere de la compresión de las partículas por no existir espacio disponible entre ellas. Esto último almacena energía debido a su compresión lenta hasta llegar al punto de que ya no sea posible seguir almacenando energía de manera *cooperativa* siendo necesaria una reconfiguración violenta del mismo hasta llegar a otro punto de equilibrio de fuerzas que sostenga otra configuración.

En este ejemplo podemos ver entonces que, dentro de los fenómenos colectivos, se observan procesos de *autoorganización*, procesos de *adaptación* y procesos *cooperativos*. Por lo que tiene sentido el uso de preguntas formativas como: ¿Qué tanto podemos cambiar el diámetro del vaso usando las mismas bolitas? ¿Qué tanto se modifican las interacciones al cambiar por un vaso más grande o más chico? ¿Qué tanto se pueden *adaptar* las bolitas a esos cambios sin que se pierda el fenómeno de *autoorganización*? ¿Qué tanto pueden "*cooperar*" las partículas al perturbar el sistema sin que se pierdan los patrones autoorganizados formados antes de la perturbación? ¿Qué tanto se pueden reorganizar nuevamente para regresar a sus configuraciones iniciales en cada caso?

Este experimento nos invita a reflexionar en lo siguiente: ¿En qué otras experiencias o contextos (sociales o económicos) puedes observar fenómenos *colectivos*?; ¿Existen también procesos de *autoorganización*?; ¿Existe la *adaptación*?; ¿Existe la *cooperatividad* y/o la *reorganización*?

Otro reto que surge de esta actividad es la graficación del diámetro de las bolitas de hidrogel respecto al tiempo transcurrido y comparar con los resultados obtenidos por otras personas. Un cuestionamiento muy interesante es cómo influye la temperatura en el crecimiento de las esferas de hidrogel. Si una persona que vive en la Ciudad de México hace el experimento ¿obtendrá lo mismo que una persona que vive en Tabasco?

La mochila permite así trasladar conceptos complejos a un nivel accesible y práctico, fomentando la curiosidad, el pensamiento crítico y la autorregulación de los procesos de aprendizaje en los estudiantes fomentando el autoaprendizaje (autodidacta) en los jóvenes estudiantes convirtiéndolos en los directores de su propio proceso de aprendizaje e investigación. Dentro de estas tendencias de aprendizaje se encuentran al menos dos maneras del llamado aprendizaje en línea, el cual puede escolarizarse o no. Debido a ello la importancia de fomentar el pensamiento crítico (autocrítico), reflexivo y honesto, con el objeto de mejorar la actividad, proyecto personal o proyecto de vida, como convertirse en científico, escritor, profesor, entre otros.

Actividad 3: La entropía y otros fenómenos colectivos. “El baile de las moléculas”. (19 de junio, 2025).

Material en la mochila: Aceite, agua, recipientes pequeños.

En esta actividad usaremos un microscopio de juguete para observar diferentes estructuras con una mayor ampliación y particularmente observaremos una muestra de una emulsión de aceite en agua, la cual para las partículas de aceite suspendidas muestra el movimiento browniano (Vázquez, Morales y Huerta, 2019) característico de la presencia y colisión colectiva de las moléculas de agua que las sostiene. Al poder observar partículas del tamaño de algunas decenas de micras, este puede grabarse con nuestros teléfonos celulares y estudiarse usando diferentes programas de cómputo, ver el cuarto video usando el código Qr. Este fenómeno

colectivo se relaciona también el concepto de difusión, ver el quinto video usando el código Qr, observado en los fenómenos irreversibles, en donde la entropía aumenta, cosa que no se puede revertir, como en el caso de la muerte celular y que recientemente se habló dentro de la red (UQROO, 2024). Se refiere a la actividad “El baile de las moléculas” publicada en el libro Analogías y casos límite de la referencia (Huerta, 2020a), así como a los videos cuatro y cinco del código Qr.

Actividad 4: Los fenómenos de criticalidad y autoorganización. “El pop-pop de las palomitas de maíz”. (21 de agosto, 2025).

Material a la mochila: Granos de maíz palomero o bolsas de palomitas de maíz para microondas.

Como hemos observado y mencionado anteriormente, la autoorganización es una de las propiedades emergentes de los sistemas complejos, como en el caso de las poblaciones humanas, de abejas, en parvadas de aves, en el cerebro, entre muchos otros. Sin necesidad de que exista un líder definido que controle a cada uno de los elementos del sistema complejo, logran llegar a una organización óptima para su funcionamiento. Es similar a un trabajo de equipo que pudiera parecer idílico, en el que cada miembro contribuye voluntariamente tomando la iniciativa de apoyar en cierto aspecto. ¿Qué tiene que ver esto con las palomitas de maíz?, ver el sexto video usando el código Qr. Uno de los proyectos de investigación que se desarrollaron con apoyo del laboratorio portable fue la construcción de una analogía entre la pérdida de la autoorganización en el cerebro, lo cual podría estar relacionado con alguna enfermedad, con la sincronización de las explosiones de palomitas de maíz. Grabando audios de palomitas de maíz explotando en un microondas se pueden obtener resultados útiles para investigarse tan profunda o superficialmente como se desee.

Si quieres saber más consulta la referencia (Paredes, 2024) y el sexto video del código Qr.

Actividad 5: La termodinámica en la cocina: agua, gelatinas, termómetros y un calorímetro portable. (9 de octubre, 2025).

Material a la mochila: Grenetina, cuchara, un termómetro y recipiente para calentar.

La cocina de cada hogar es un laboratorio, quizás con medidas de seguridad más reducidas, pero en este espacio se cuenta con recipientes en el que combinan componentes para hacer mezclas, ayudándose con frecuencia del calor con parrillas u hornillas. En este laboratorio es posible observar directamente transiciones de fase, como la evaporación del agua en una olla sobre la estufa o la transición del agua líquida hasta convertirse en un hielo en el refrigerador. Por si fuera poco, muchos de los alimentos que se preparan son materia condensada blanda, una mezcla de estados de agregación de la materia, por lo cual hay demasiadas posibilidades para explorar. En esta actividad se plantea la construcción de un calorímetro portable, con el cual sería posible recopilar datos para observar las transiciones de fase del agua sólido-líquido y de líquido-vapor.

También se hablará de los procesos *reversibles* e *irreversibles*, siendo la transición de la gelatina un proceso reversible, aunque no ocurre lo mismo, por ejemplo, al preparar un té, por los procesos difusivos.

Si quieres saber más, puedes consultar el séptimo video de las Jornadas Nacionales de Física de 2024 en la lista de reproducción que se muestra escaneando el código Qr del inicio, así como la publicación (Huerta, 2020b).

Actividad 6: Las máquinas térmicas. “El pop-pop de un barquito de vapor”. (11 de diciembre, 2025)

Finalmente se refiere a la actividad descrita en el Libro de ecopedagogía (Koltieniuk, Gálvez y Huerta, 2023, 131-154), que hemos desarrollado y aplicado en diferentes talleres y ferias científicas.

Conclusiones y reflexiones finales.

La enseñanza de la ciencia a través de enfoques basados en sistemas complejos y fenómenos colectivos permite una comprensión más profunda de la realidad que nos rodea, brindándonos luz acerca de valores que surgen naturalmente en las sociedades. La propuesta de la *Mochila de la Complejidad* representa una alternativa innovadora para acercar estos conceptos a los estudiantes mediante experiencias prácticas y accesibles. Al integrar experimentos portables en el aula y en distintos entornos educativos, se fomenta el aprendizaje significativo, la curiosidad

y el pensamiento interdisciplinario.

Además, este enfoque promueve la conexión entre la ciencia y los valores humanos y sociales, alineándose con los principios educativos de la Universidad Veracruzana y con modelos educativos como la Nueva Escuela y la tendencia STEAM. La capacidad de reconocer patrones en la naturaleza y extrapolarlos a diversas disciplinas fortalece el pensamiento crítico y creativo, preparando a los estudiantes para enfrentar los retos del mundo actual con una visión holística y sistémica.

El uso de modelos y analogías facilita la apropiación del conocimiento y refuerza la idea de que la ciencia no solo es una herramienta para describir el mundo, sino también para experimentarlo y transformarlo. Así, el estudio de la complejidad no solo amplía nuestras fronteras del conocimiento, sino que también abre la puerta a nuevas formas de enseñanza y aprendizaje, adaptadas a los desafíos de nuestra sociedad.

La presentación de los resultados de la implementación de estas actividades requeriría al menos otro capítulo completo, sin embargo, esperamos que el planteamiento de estas propuestas, así como el material digital y las referencias proporcionadas, sea utilizado por más docentes y estudiantes en contextos y necesidades diversas. Cumpliéndose que, al adaptar las actividades a las necesidades particulares, cualquiera pueda reapropiarse de los conceptos de *autoorganización*, *adaptabilidad* y *cooperatividad* al experimentar nuestros entornos con un laboratorio de complejidad en nuestra mochila.

Referencias

Benet, L. (2012, diciembre 31). Caos determinista, con lápiz y papel. Academia de Ciencias de Morelos, A.C. Recuperado Febrero 1, 2025, de <https://www.acmor.org/perfiles/dr-luis-benet-fern-ndez>

Benet, L. (2013). Descubriendo anillos. In La Ciencia desde Morelos para el Mundo. Tomo III Química, Física y Matemáticas (pp. 111-113). Enrique Galindo, et al. https://web.siiia.unam.mx/siia-publico/v/include/modulo_productos/libros.php?id=163853

Carmona, G. (2007). Termodinámica clásica. UNAM, Facultad de Ciencias.

Catalá Rodes, R. M., García Franco, A., y Chamizo, J. A. (2024, septiembre). Ciencias, Tecnologías y Sociedades. La Nueva Escuela Mexicana. Educación Química, 35(Especial), 124-146. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2024.4.88942e>

Cruz, J., Zermeño, D., y Huerta, A. (2025). Experiencias con el desarrollo de un calorímetro portable de bajo costo como parte de la metodología del aprendizaje por competencias basado en el método de investigación científica para un desarrollo educativo, cultural y tecnológico de las regiones de nuestro estado. En J. Arcos, J. Rodríguez, y A. Juárez (Coords). Educación, Ciencia y Cultura en espacios contemporáneo. Retos y perspectivas en el siglo XXI.

Huerta, A. (2020a). El baile de las moléculas. En J. Flores, K. Volke, O. Miramontes, y S. Sanchez (Eds.), Analogías y conexiones en la Física (1ra ed., pp. 211-218). Copit-Arxives. Recuperado de <https://copitarxiv.es/fisica.unam.mx/TS0020ES/TS0020ES.html>

Huerta, A. (2020b, febrero 2). Termodinámica en la Cocina. Obtenido de El Jarocho Cuántico. Suplemento Científico de la Jornada Veracruz. Recuperado de <https://www.uv.mx/ffia/files/2022/08/JarochoCuanticoFeb20.pdf>

Huerta, A., Hernández, G., y Sampieri, R. (2023). Una Propuesta de Estrategias Ecopedagógicas para Incluir en las Actividades del Laboratorio de Materiales Blandos 'Portable'. En G. Hernández, J. L. Pérez, & A. Simbaqueba (Coords). Ecopedagogía. Educación relacional en el ser y el hacer complejos (pp. 177-198). México: Editorial académica, Plaza y Valdés. Recuperado de www.uv.mx/personal/jedorantes/files/2024/01/Ecopedagogia-Educacion-relacional-en-el-ser-y-el-hacer-complejos.pdf

Huerta, A., Hernández, G., García, A., Silva, L. (2025), El Laboratorio de materiales blandos como una estrategia de aprendizaje e inclusión DIDAC, 86, Jul-Dic: Hacia la inclusión y equidad educativa: prácticas y experiencias de innovación y transformación Recuperado de https://doi.org/10.48102/didac.2025..86_JUL-DIC.284

Kolteniuk, M., Gálvez, M., y Huerta, A. (2023). El barquito de vapor “pop-pop” como una estrategia ecopedagógica en las actividades del laboratorio de materiales blandos ‘portable’. En En G. Hernández, J. L. Pérez, & A. Simbaqueba (Coords). Ecopedagogía. Educación relacional en el ser y el hacer complejos (pp. 131-154). México: Editorial académica, Plaza y Valdés. Recuperado de www.uv.mx/personal/jedorantes/files/2024/01/Ecopedagogia-Educacion-relacional-en-el-ser-y-el-hacer-complejos.pdf

Leyva Rayón, E. (2019, 15 de febrero). Econofísica. Blog UDLAP. Recuperado de <https://blog.udlap.mx/blog/2019/02/15/econofisica/>

Paredes, M. (2024). Analogía entre la intermitencia de explosiones de palomitas de maíz con las avalanchas cerebrales en la región crítica. (Tesis de Licenciatura, Dir. Dr. A. Huerta; Codir. Dra. L. López, Facultad de Física, Universidad Veracruzana, México).

Peralta, C. (2019, 18 de febrero). CIENCIA “Sábados en la Ciencia” retoma actividades el 23 de febrero. Prensa UV. Recuperado enero 30, 2025, de <https://www.uv.mx/prensa/ciencia/sabados-en-la-ciencia-retoma-actividades-el-23-de-febrero/>

Rodríguez, M. (2018). Modelos de Influencia Social con Repulsión y Tensión Superficial. (Dir. M. en C. A. Rodillo, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México). Recuperado de <https://tesiumamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2018/febrero/0770138/0770138.pdf>

Sociedad Mexicana de Física. (2025, 23 de enero). Jornadas Nacionales de Física 2025 Convocatoria. jnf-2025-convocatoria. Recuperado enero 30, 2025, de <https://smf.mx/jnf-2025-convocatoria/>

Telescopio espacial James Webb. (s.f.). Wikipedia. Recuperado February 11, 2025, de https://es.wikipedia.org/wiki/Telescopio_espacial_James_Webb

Universidad Veracruzana. (1999). Nuevo Modelo Educativo - Guía metodológica para el diseño de planes y programas de estudio. Universidad Veracruzana. Recuperado January 30, 2025, de <https://www.uv.mx/>

uv.mx/dgdaie/guia-diseno/pee-indicaciones/

Universidad Veracruzana. (2020, 3 de septiembre). Conacyt reconoce trabajo de divulgación científica de académico y alumno UV. Universo Sistema de noticias de la Universidad Veracruzana. <https://www.uv.mx/prensa/ciencia/conacyt-reconoce-trabajo-de-divulgacion-cientifica-de-academico-y-alumno-uv/>

UQROO. (2024, 13 de noviembre). Departamento de Humanidades y Antropología celebra la vida a través de la muerte A través de actividades multidisciplinarias, estudiantes, académicos y miembros de la comunidad reflexionan sobre el significado cultural de la muerte. UQROO SALA DE PRENSA. <https://saladeprensa.uqroo.mx/noticias/6066/>

Urieta, V. (2023). Estudio de la dimensión fractal de un modelo DLA de cristales ramificados producidos fuera de equilibrio (Tesis de Licenciatura Dir. Dr. A. Huerta, Facultad de Física, Universidad Veracruzana, México).

Vázquez, G., Morales, G., y Huerta, A. (2019). Una danza azarosa. La Ciencia y el Hombre, XXXII(3), 28-33.

Yañez, G. Y., y López, R. (2020, 10 21). #InformaciónConCiencia Laboratorio de Materiales Blandos "Portable". Oliva Noticias. https://www.olivanoticias.com/de_interes/141333/informacionconciencia_laboratori