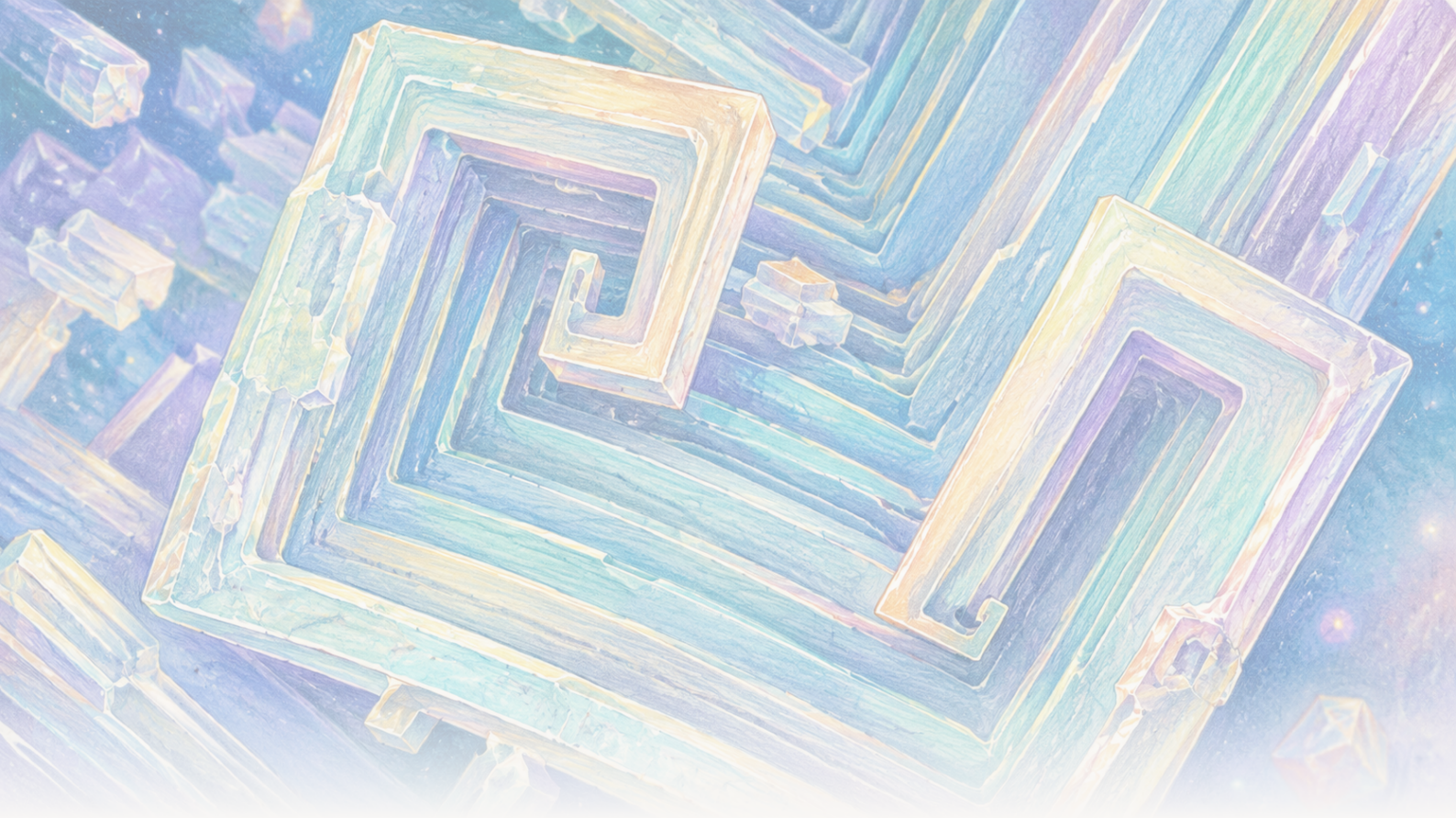


The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

En órbita, la sal común formó cubos huecos. La gravedad cambió la salmuera, no la sal

Los cristales de cloruro de sodio cultivados en la Estación Espacial Internacional incluyeron cubos huecos y escalonados de entre 2 y 8 milímetros. Los artículos respaldan una explicación basada en el transporte: la sedimentación ordinaria y el flujo impulsado por flotabilidad quedaron fuertemente reducidos, mientras que la difusión dominó el crecimiento inicial. La red no se convirtió en una nueva forma de sal y los experimentos no establecen un proceso industrial.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions*, Donald Pettit and Pietro Fontana, npj Microgravity 5, 25 (2019) · DOI: 10.1038/s41526-019-0085-0

En órbita, la sal común creció formando cubos huecos y escalonados

Los cristales parecían obras arquitectónicas: marcos cuadrados encajados unos dentro de otros, con las caras ahuecadas en forma de escaleras.

Estaban hechos de cloruro de sodio corriente, el mismo compuesto que la sal de mesa. Lo inusual no era el material, sino la salmuera que lo rodeaba.

En la Tierra, un cristal que crece dentro de un volumen de líquido de escala centimétrica puede hundirse, tocar una pared o superficie y contribuir a crear diferencias de densidad que hacen circular la solución. En la Estación Espacial Internacional, la sedimentación ordinaria y el flujo impulsado por flotabilidad quedaron fuertemente reducidos. Algunos cristales de sal permanecieron suspendidos el tiempo suficiente para crecer despacio y de manera más simétrica, formando **cubos tipo tolva** con aristas de entre 2 y 8 milímetros.

Tres artículos, publicados en 2011, 2015 y 2019, describen estos experimentos. En conjunto ofrecen una lección clara de física del transporte: cambiar la forma en que el material disuelto llega a un cristal puede modificar su aspecto visible sin alterar su estructura atómica.

No demuestran que el espacio produzca cristales perfectos, ni establecen un proceso industrial, ni revelan un nuevo tipo de sal.

Qué convierte un cubo en un cristal tipo tolva

Un cristal normal de cloruro de sodio posee una disposición atómica cúbica. Un **cristal tipo tolva** sigue siendo cúbico, pero sus esquinas y aristas crecen antes que el centro de las caras. El resultado es una depresión hueca y escalonada en cada cara, como si el cubo intentara construir primero el armazón y rellenar después las paredes.

Un ejemplo posterior de la ISS permite ver bien ese patrón de crecimiento, pero aporta contexto y no pruebas procedentes de los tres artículos sobre cloruro de sodio. La imagen y el vídeo acelerado de Donald Pettit que aparecen a continuación muestran **cloruro de potasio**, una sal distinta, formando en microgravedad morfologías escalonadas tipo tolva y en espiral.

[figure_pair pending]

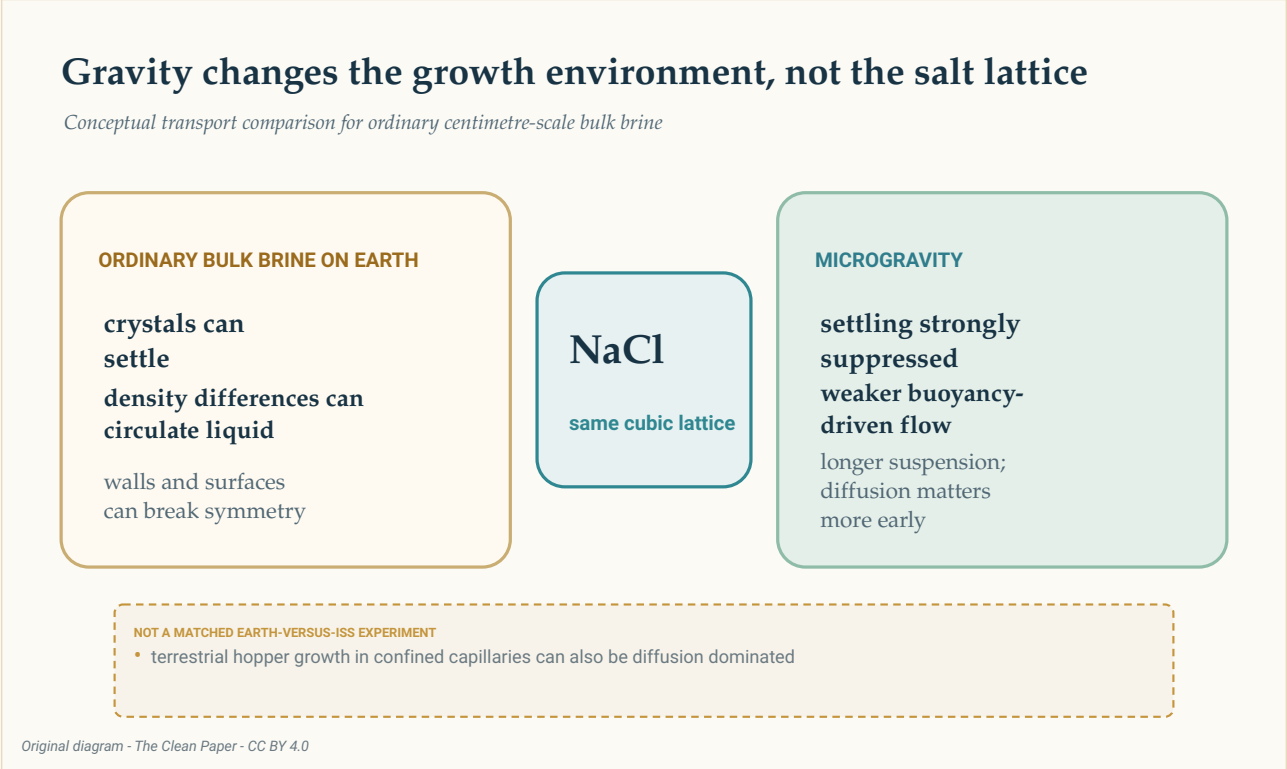
Dos micrografías electrónicas de barrido de cristales tipo tolva y en espiral de cloruro de potasio cultivados a bordo de la ISS. Estas imágenes posteriores son ejemplos contextuales de la morfología, no muestras de cloruro de sodio ni mediciones de los estudios de 2011, 2015 o 2019 analizados en este artículo.

[video pending]

Un vídeo acelerado posterior del crecimiento de cloruro de potasio tipo tolva dentro de una fina película de agua en microgravedad. Ilustra el crecimiento de aristas y esquinas, no los experimentos ni los datos de cloruro de sodio analizados en este artículo.

Los cristales crecen a partir de **salmuera sobresaturada**: agua salada que contiene más cloruro de sodio disuelto del que mantendría en equilibrio bajo esas condiciones. Los iones de sodio y cloruro deben desplazarse a través del líquido e incorporarse a la superficie del cristal.

Hay dos formas generales de transportarlos. La **difusión** es el movimiento molecular aleatorio que lleva el material disuelto a lo largo de una diferencia de concentración sin circulación masiva del líquido. La **convección** es el movimiento del propio líquido. Bajo gravedad ordinaria, pequeñas diferencias de temperatura o concentración pueden modificar la densidad e impulsar circulación por flotabilidad. Los cristales también pueden **sedimentar**, es decir, asentarse en el líquido.



Una comparación conceptual muestra la misma red de cloruro de sodio en ambos entornos. En la Tierra, una salmuera ordinaria de volumen apreciable puede presentar sedimentación, circulación por flotabilidad y contacto con superficies; la microgravedad reduce mucho los dos primeros fenómenos, permite una suspensión más prolongada y hace que la difusión sea más importante al principio del crecimiento. No fue un experimento emparejado Tierra-ISS.

The Clean Paper CC BY 4.0

El experimento se realizó a bordo de la Estación Espacial Internacional, un laboratorio orbital de microgravedad. La palabra **microgravedad** no significa ausencia de gravedad. El artículo de 2019 comunicó una aceleración residual de aproximadamente 1,2 millonésimas de la gravedad en la superficie terrestre, es decir, 1,2 micro-g, además de un movimiento líquido cíclico y lento. El entorno cambió el equilibrio del transporte; no dejó la salmuera perfectamente inmóvil.

Una ruta lenta hacia cubos de escala milimétrica

El estudio de 2019 se centró en cubos tipo tolva que crecieron al evaporarse agua de la salmuera en la ISS. Las aristas comunicadas medían entre **2 y 8 milímetros**. Las velocidades de crecimiento oscilaron entre **0,34 y 1,0 micrómetros por minuto** —aproximadamente **0,49 a 1,44 milímetros por día**—, con una media de **0,68 micrómetros por minuto** y una desviación estándar de 0,23.

A esa velocidad media, una arista de 8 milímetros tardaría aproximadamente una semana en desarrollarse. El cálculo es una estimación, no una medición en vídeo acelerado de todas las etapas de un único cristal.

Los autores estimaron una sobresaturación inferior a **1,002**. La literatura terrestre utilizada como comparación describía crecimiento tipo tolva a sobresaturaciones mucho mayores, por encima de 1,45, y a velocidades de 10 a 110 micrómetros por segundo durante segundos o minutos, que normalmente producían cubos menores de 250 micrómetros.

La comparación es informativa, pero no emparejada. Los cristales de la ISS y la literatura terrestre no procedían de brazos simultáneos e idénticos, uno en la Tierra y otro en órbita, ejecutados por el mismo equipo. Las diferencias de recipientes, interfaces y métodos también pueden influir junto con la gravedad.

Por tanto, el contraste más sólido es descriptivo: en estas observaciones de la ISS, los cubos tipo tolva crecieron lentamente, con baja sobresaturación, durante días o semanas, y alcanzaron escala milimétrica.

La difusión dominó al principio; más tarde seguía siendo posible el flujo

El artículo de 2019 utilizó el **número de Péclet** para comparar el transporte por movimiento del líquido con el transporte por difusión. Un valor menor que uno indica que la difusión es más importante; un valor mayor que uno indica que el movimiento masivo puede dominar.

> **Una razón, no un interruptor**
>
> El número de Péclet compara dos velocidades de transporte. No divide el mundo entre líquido perfectamente quieto por debajo de uno y convección pura por encima de uno. Aquí el valor cambió con el tamaño del cristal y con la estimación de velocidad empleada para la salmuera circundante. Los cristales más pequeños estaban claramente en un régimen dominado por difusión; el cristal mayor del recipiente grande pudo entrar en un régimen donde importaba el lento movimiento del líquido.

En las gotas más pequeñas, de aproximadamente 0,8 centímetros, los valores estimados de Péclet aumentaron desde cerca de **0,0004** en torno a la nucleación hasta aproximadamente **0,03** en el tamaño

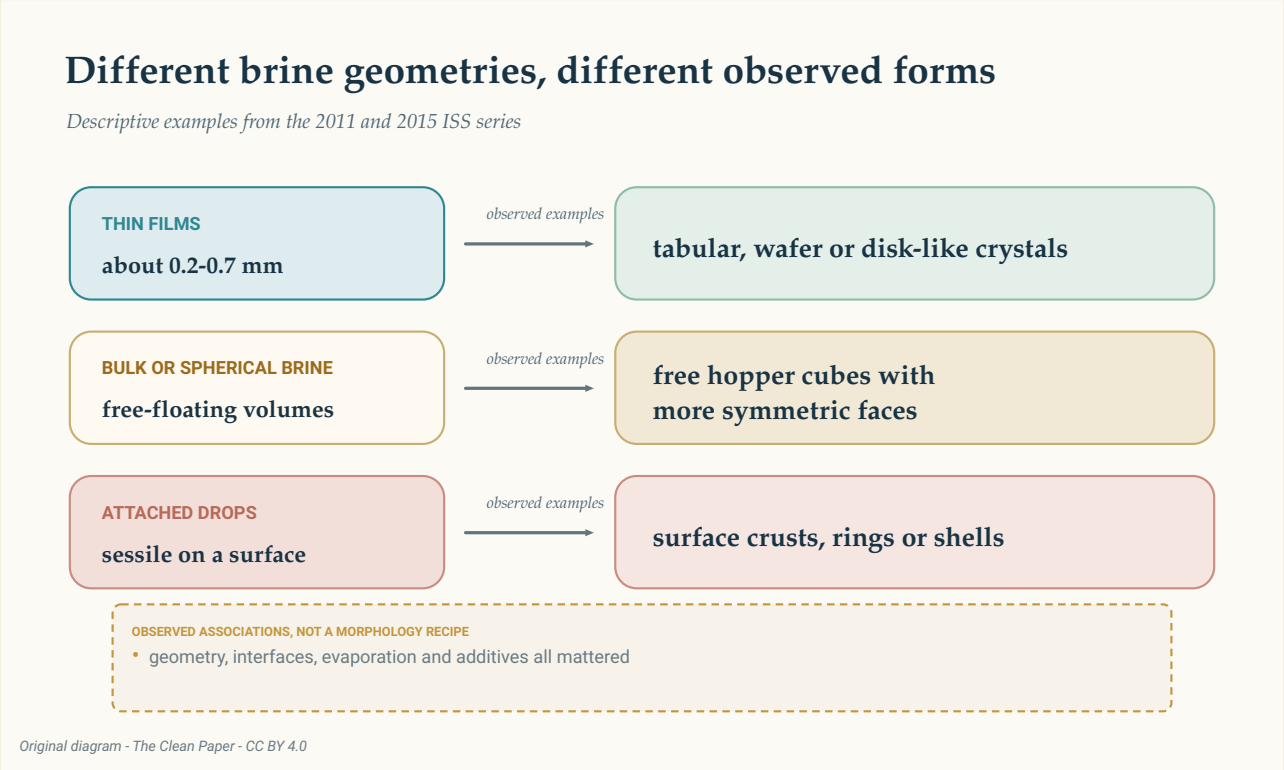
final medido. La difusión siguió dominando.

En cristalizadores de 2 a 3 centímetros, la estimación aumentó desde aproximadamente **0,05** para un núcleo de 50 micrómetros hasta cerca de **4** para una arista de 4 milímetros. El crecimiento inicial seguía dominado por difusión, pero el movimiento cíclico lento pudo contribuir más adelante.

Por eso sería incorrecto decir que «la microgravedad eliminó la convección». La circulación ordinaria impulsada por flotabilidad y la sedimentación quedaron muy reducidas. La aceleración residual y un movimiento medible permanecieron.

También importaba la forma del líquido

El artículo de 2011 y el de 2015 ampliaron la imagen. Comunicaron cristalización de sal en películas finas, capas líquidas más gruesas, volúmenes de salmuera aproximadamente esféricos y gotas adheridas a una superficie.



Tres filas resumen ejemplos observados en el conjunto de estudios: películas finas con formas tabulares o semejantes a discos; salmuera de volumen apreciable o esférica con cubos tipo tolva libres; y gotas adheridas con costras, anillos o cáscaras. Son asociaciones descriptivas, no una receta ni una garantía.

The Clean Paper CC BY 4.0

En el estudio de 2011, películas finas de aproximadamente 0,2 a 0,7 milímetros de espesor produjeron láminas delgadas y cristales tabulares. Los volúmenes de salmuera que flotaban libremente permitieron caras laterales más simétricas y cubos tipo tolva.

Las observaciones de 2015 incluyeron láminas finas de 0,2 a 0,7 milímetros, capas más gruesas de unos 4 a 6 milímetros y gotas hemisféricas adheridas de aproximadamente 20 a 32 milímetros de diámetro. Entre las formas comunicadas había tolvas tabulares, cubos, cristales semejantes a discos, dendritas, anillos y cáscaras. La adición de polietilenglicol suprimió el crecimiento tipo tolva en un conjunto de observaciones.

Los autores describieron el trabajo de 2015 como observaciones realizadas con suministros no inventariados durante el tiempo libre de la tripulación, no como una investigación programática rigurosa. Los ejemplos muestran que la geometría del líquido, las interfaces, la evaporación y los aditivos eran importantes. No definen una receta determinista en la que una forma de recipiente garantice una forma de cristal.

La red no se convirtió en una nueva forma de sal

La diferencia entre **estructura cristalina** y **morfología** es esencial.

La estructura es la disposición atómica repetida. La morfología es la forma externa visible. La difracción de neutrones del artículo de 2011 no identificó cambios en la estructura del cloruro de sodio ni en los parámetros de la celda cristalina respecto a muestras terrestres. Las muestras orbitales también contenían **inclusiones de salmuera**, pequeñas bolsas de solución atrapadas dentro del cristal.

Por tanto, el aspecto grande y simétrico no demuestra que el material fuera más puro o careciera de defectos. Ninguno de los artículos del conjunto comunica mayor pureza química, mejor rendimiento mecánico o idoneidad para un dispositivo concreto.

La gravedad actuó de manera indirecta. Modificó la sedimentación, la circulación del líquido, la orientación y el contacto con superficies. No alteró la fuerza de los enlaces del cloruro de sodio ni creó una nueva fase atómica.

Qué pueden y qué no pueden enseñarnos estos experimentos

Los artículos respaldan una explicación basada en el transporte: al reducir fuertemente la sedimentación ordinaria y el flujo impulsado por flotabilidad, algunos cristales pudieron permanecer suspendidos y crecer despacio bajo condiciones más simétricas. Los tamaños, velocidades y formas medidos son observaciones directas; la sobresaturación, la historia de crecimiento y los números de Péclet incluyen estimaciones; la comparación con la Tierra se basa en parte en otros experimentos publicados.

No existe un único denominador limpio para todo el conjunto. Combina cristales individuales, cristalizadores y ejemplos seleccionados de tres artículos. Sumarlos en un total daría a entender que hubo un experimento uniforme que en realidad no existió.

Los estudios tampoco aportan las pruebas necesarias para sostener una afirmación de fabricación. No miden caudal, coste de producción, uso de energía, rendimiento, fiabilidad ni prestaciones útiles del material. La serie de 2015 fue exploratoria. Las comparaciones terrestres no fueron controles emparejados. Y que algo sea grande o visualmente llamativo no significa que sea mejor para una aplicación.

Los depósitos naturales de sal pueden contener cubos tipo tolva de centímetros, a veces suspendidos en barro empapado de salmuera. El artículo de 2019 propone una posible analogía con un crecimiento lento y dominado por difusión. Es una comparación interesante, no una demostración de que las tolvas naturales y orbitales compartan un único mecanismo.

En pocas palabras

Los cristales de sal cultivados a partir de salmuera en evaporación en la Estación Espacial Internacional incluyeron cubos huecos y escalonados tipo tolva de entre 2 y 8 milímetros. Los artículos respaldan una explicación basada en el transporte: la microgravedad redujo fuertemente la sedimentación ordinaria y el flujo impulsado por flotabilidad, lo que permitió un crecimiento lento y una suspensión más prolongada mientras la difusión dominaba al principio. La geometría del líquido, las interfaces, la evaporación y los aditivos también afectaron a la morfología. La difracción de neutrones no mostró una nueva estructura de cloruro de sodio, y persistieron inclusiones de salmuera. El trabajo es un estudio de caso delimitado de ciencia de materiales, no una demostración de que el espacio produzca cristales perfectos o permita un proceso industrial.

Sin rodeos

Lo que muestran los artículos: en varias geometrías de salmuera de la ISS crecieron cubos tipo tolva de cloruro de sodio de escala milimétrica y otras morfologías. Los cubos tipo tolva del estudio de 2019 crecieron despacio, con baja sobresaturación estimada y difusión dominante al principio.

Lo que se interpreta: la fuerte reducción de la sedimentación y del flujo impulsado por flotabilidad permitió una suspensión más prolongada y un crecimiento más simétrico. El lento movimiento del líquido pudo importar en fases tardías dentro del cristalizador mayor.

Lo que no muestran: una nueva forma atómica de sal, cristales más puros o libres de defectos, un ensayo emparejado Tierra-ISS, una ventaja universal de la microgravedad ni una ruta comercial de fabricación.

Limitaciones principales: tres estudios distintos con geometrías y ejemplos seleccionados diferentes; comparaciones terrestres entre estudios; magnitudes de transporte estimadas; partes exploratorias y no programáticas del conjunto; y ausencia de economía de proceso o pruebas de rendimiento.

¿Cuánta confianza debería tener un lector general? Confianza alta en que las morfologías orbitales

comunicadas y el crecimiento lento son reales. Confianza moderada en la explicación por transporte como mejor interpretación del conjunto de observaciones. Confianza muy baja en cualquier afirmación que convierta estos experimentos con sal en una promesa general sobre fabricación espacial.

Fuentes

Pettit and Fontana, Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions, npj Microgravity 5, 25 (2019)
https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0

Fontana, Schefer and Pettit, Characterization of sodium chloride crystals grown in microgravity, Journal of Crystal Growth 324, 207-211 (2011)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001

Fontana, Pettit and Cristoforetti, Sodium chloride crystallization from thin liquid sheets, thick layers, and sessile drops in microgravity, Journal of Crystal Growth 428, 80-85 (2015)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026