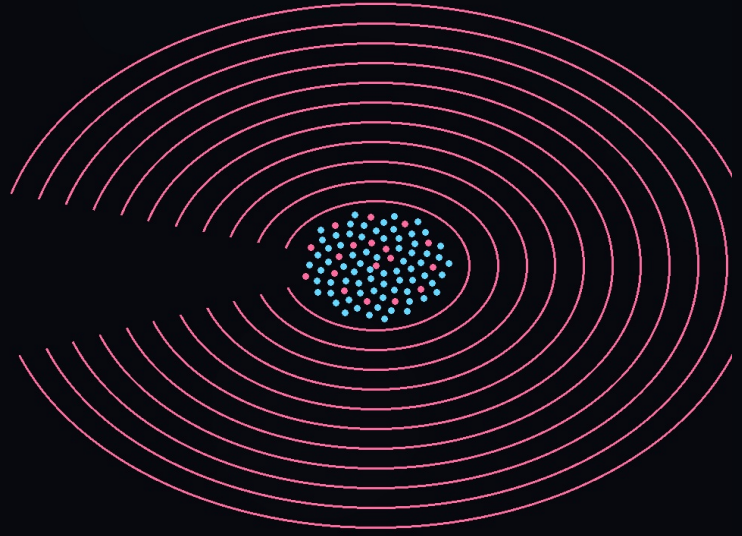


MÚSICA EN EL CAOS

PAPER ACADÉMICO · PREPRINT 01



Música en el Caos

Diseño, taxonomía y validación técnica de un atlas web de sonificación causal para 83 sistemas complejos

Fernando Rodríguez Cortés (FERROCOR_)

Música en el Caos · proyecto independiente · Chile

Preprint de proyecto · versión 1.0 · 6 de agosto de 2026

musicaenelcaos.cl · CC BY-NC-SA 4.0 · no revisado por pares

Contenido

Resumen

Abstract

Contribuciones principales

1. Introducción

2. Marco conceptual

3. Materiales y métodos

4. Resultados

5. Estudios de caso

6. Discusión

7. Limitaciones

8. Programa de trabajo futuro

9. Conclusión

Declaraciones

Referencias metodológicas

Apéndice A. Inventario canónico de los 83 especímenes

Apéndice B. Taxonomía operacional de métodos

Apéndice C. Matriz de verificación de la versión documentada

Apéndice D. Requisitos mínimos por espécimen

Apéndice E. Bibliografía consolidada de los especímenes

Apéndice F. Nomenclatura y lectura de la ficha

Historial de versión del manuscrito

Nota editorial. *Este manuscrito documenta el diseño y la verificación técnica de un artefacto digital. No ha sido revisado por pares y no presenta la colección como científicamente ni perceptivamente validada. La publicación permite someter métodos, decisiones y límites a revisión pública.*

Resumen

La sonificación puede hacer audibles relaciones que una representación exclusivamente visual deja implícitas, pero su valor depende de que la transformación entre datos y sonido sea trazable, reproducible y epistemológicamente prudente. Este artículo presenta *Música en el Caos* (MEC), un atlas web experimental en el que 83 fenómenos de sistemas complejos se convierten en instrumentos generativos interactivos. La colección se organiza en 15 familias —desde sistemas dinámicos, autómatas y morfogénesis hasta fluidos, mecánica celeste, cuántica y electromagnetismo— y adopta cinco métodos nativos de sonificación: audificación (AUD), eventos propios (EVT), parámetros de orden (ORD), resonadores o modos (RES) y distribución o campo (DST). La contribución central no es una biblioteca de ambientaciones musicales, sino una arquitectura de **sonificación causal**: la gráfica, el audio y las exportaciones derivan del mismo estado numérico y del mismo reloj de simulación, de modo que una intervención sobre el modelo debe producir consecuencias visuales y auditivas coherentes.

Se describe un proceso de investigación mediante diseño y auditoría de artefacto que combina inventario científico, normalización de interfaz, contrato de audio, pruebas automatizadas, ejecución en navegador y clasificación explícita de la evidencia. El corpus contiene 36 reconstrucciones profundas y 47 implementaciones apoyadas en una capa causal por familia. Las auditorías de la versión documentada comprobaron 83/83 estructuras de publicación, 83/83 contratos de audio y rangos de seis octavas, 27 modelos nuevos o reconstruidos mediante 162 escenarios y 81 controles causales, y 84/84 documentos en una revisión automatizada de accesibilidad sin hallazgos en los criterios programados. Una ronda posterior de comportamiento en navegador observó movimiento en reposo, continuidad del movimiento con audio y evidencia de señal sonora en 83/83 especímenes, sin errores de consola; una prueba específica de transformaciones verificó 27/27 modelos y Filotaxis. Estos resultados demuestran integridad de implementación dentro del entorno ensayado, no equivalencia física completa, eficacia perceptiva ni validez externa.

El artículo discute las ventajas y riesgos de una gramática musical común: facilita comparaciones transdisciplinarias, pero puede homogeneizar fenómenos distintos o introducir regularidades musicales ausentes en el modelo. Se proponen por ello niveles de evidencia incrementales, fichas científicas con límites visibles, exportaciones reproducibles y un programa futuro de evaluación perceptiva, revisión disciplinar externa y preservación citable. MEC se plantea como un instrumento de exploración pública en la intersección entre ciencia, arte sonoro y software reproducible.

Palabras clave: sonificación; sistemas complejos; arte generativo; interacción web; Web Audio API; visualización científica; reproducibilidad; ciencia abierta; diseño de instrumentos.

Abstract

Sonification can make relationships audible that remain implicit in visual displays, but its epistemic value depends on whether the transformation from data to sound is traceable, reproducible, and cautiously interpreted. This article presents *Music in Chaos* (MEC), an experimental web atlas in which 83 complex-system phenomena become interactive generative instruments. The collection comprises 15 families and five native sonification methods: audification (AUD), endogenous events (EVT), order parameters (ORD), resonators or modes (RES), and distributions or fields (DST). Its central contribution is an operational architecture of **causal sonification**: graphics, audio, and exports derive from the same numerical state and simulation clock, so interventions in the model must produce coherent visual and auditory consequences.

We describe a research-through-design and artifact-audit process that combines scientific inventory, interface normalization, an audio contract, automated tests, browser execution, and explicit evidence levels. The documented corpus contains 36 deep reconstructions and 47 implementations supported by a family-level causal layer. Audits verified 83/83 publication structures, 83/83 audio contracts and six-octave ranges, 27 new or reconstructed models across 162 scenarios and 81 causal controls, and 84/84 documents in an automated accessibility review with no findings under the

programmed criteria. A subsequent browser behavior round observed idle motion, continued motion with audio, and audible-signal evidence in 83/83 specimens without console errors; a dedicated transformation test verified 27/27 models and Phyllotaxis. These results establish implementation integrity within the tested environment, not full physical equivalence, perceptual effectiveness, or external validity.

The paper discusses the benefits and risks of a common musical grammar. It supports cross-domain comparison, yet it may homogenize distinct phenomena or introduce musical regularities absent from the underlying model. We therefore propose incremental evidence levels, visible scientific limitations, reproducible exports, and a future program of perceptual evaluation, external disciplinary review, and citable preservation. MEC is positioned as a public exploratory instrument at the intersection of science, sound art, and reproducible software.

Keywords: sonification; complex systems; generative art; web interaction; Web Audio API; scientific visualization; reproducibility; open science; instrument design.

Contribuciones principales

- 1 Un atlas navegable de 83 especímenes pertenecientes a 15 familias de fenómenos complejos, con una nomenclatura y ficha editorial comunes.
- 2 Una definición operacional de sonificación causal basada en estado, reloj e intervención compartidos entre visualización, audio y exportación.
- 3 Una taxonomía de cinco métodos nativos que evita tratar todo mapeo como una simple traducción de magnitudes a altura.
- 4 Un contrato común de interacción, seguridad auditiva, accesibilidad y trazabilidad que permite comparar instrumentos sin borrar su especificidad científica.
- 5 Una separación explícita entre verificación de software, validación computacional, evaluación perceptiva y revisión científica externa.
- 6 Un corpus bibliográfico consolidado y una hoja de ruta reproducible para convertir un proyecto artístico-técnico en un objeto de escrutinio académico.

1. Introducción

Los sistemas complejos plantean un problema doble de representación. Por una parte, describen dinámicas que pueden ser no lineales, multiescalares, estocásticas o emergentes; por otra, sus imágenes más reconocibles —atractores, fractales, patrones de reacción-difusión o campos de partículas— tienden a convertirse rápidamente en iconos desligados del proceso que las produce. Una figura puede ser visualmente convincente y, sin embargo, ocultar el tiempo, la transición, la inestabilidad o la relación causal entre variables. La escucha ofrece un canal temporal especialmente sensible a periodicidades, cambios de régimen, sincronías, densidades y eventos, pero sólo adquiere valor analítico cuando existe una relación defendible entre el estado del sistema y la experiencia sonora.

La tradición de la sonificación y la visualización auditiva ha insistido en que el sonido debe transmitir información, no limitarse a acompañar una representación (Kramer et al., 1999; Hermann, 2008; Hermann et al., 2011). Dubus y Bresin (2013), tras revisar 179 publicaciones y 60 proyectos, mostraron a la vez la diversidad y la concentración de las estrategias de mapeo: la altura es frecuente, pero convive con intensidad, duración, espacialización, timbre y estructuras temporales. Esta amplitud abre posibilidades artísticas y científicas, aunque también dificulta comparar sistemas, repetir sesiones y distinguir las decisiones del modelo de las decisiones musicales.

Música en el Caos nació como una colección de experimentos audiovisuales ejecutables en el navegador. Su desarrollo reveló una tensión productiva. Si cada fenómeno se convierte en una pieza autónoma, la colección conserva riqueza expresiva pero pierde coherencia comparativa; si todos los fenómenos se fuerzan a una plantilla idéntica, la interfaz

mejora, pero la singularidad matemática puede quedar reducida a una decoración temática. La recomposición del atlas abordó esa tensión mediante una interfaz común y métodos nativos diferentes. La uniformidad se aplica a las condiciones de uso —transporte, volumen, registro de sesión, ficha, límites y exportación—, no a la identidad sonora de cada fenómeno.

El término **sonificación causal** se usa aquí en un sentido operativo y verificable: el sistema numérico que actualiza la gráfica produce también los descriptores que controlan el sonido; ambos avanzan bajo un reloj compartido; y los controles declarados como científicos intervienen sobre parámetros que modifican ese estado. No se afirma que el sonido sea una transducción física literal en todos los casos. En algunos instrumentos existe audificación directa o síntesis física; en otros, los descriptores del modelo se asignan a dimensiones musicales. La exigencia común es que la cadena pueda explicarse, inspeccionarse y repetirse.

El presente estudio responde cuatro preguntas. **P1:** ¿cómo organizar una colección heterogénea sin confundir homogeneidad de interfaz con equivalencia de método? **P2:** ¿qué arquitectura permite mantener acoplados modelo, imagen, audio y exportación durante la interacción? **P3:** ¿qué evidencia técnica puede obtenerse de manera automatizada y qué afirmaciones siguen requiriendo escucha humana o revisión experta? **P4:** ¿qué valor comparativo emerge cuando fenómenos de distintas disciplinas comparten una gramática musical explícita?

El objetivo no es probar que el atlas sea un instrumento de medición ni que cada representación sustituya una simulación científica especializada. El objetivo es documentar un artefacto de exploración, sus decisiones, pruebas y límites, de manera que pueda ser criticado y mejorado. La transparencia sobre lo que todavía no está validado constituye parte del resultado.

2. Marco conceptual

2.1. De la visualización auditiva a la sonificación interactiva

Hermann (2008) propuso delimitar la sonificación mediante condiciones que incluyen la existencia de relaciones objetivas en los datos, una transformación sistemática, la inteligibilidad de cómo cambian los resultados cuando cambia el dato y la repetibilidad con datos y opciones iguales. Este último criterio es decisivo para MEC: una experiencia sonora generativa no tiene por qué repetir muestra a muestra una interpretación, pero sí debe conservar la semilla, los parámetros y la lógica suficientes para reconstruirla o auditarla.

La sonificación interactiva introduce un circuito cerrado. El usuario escucha, modifica un parámetro y percibe una respuesta; el sonido deja de ser un informe posterior y se convierte en parte del razonamiento situado. Tal circuito sólo es informativo si la acción afecta efectivamente al modelo y no a una capa escénica independiente. Por ello, el atlas distingue los controles científicos —los que cambian parámetros del fenómeno— de los controles de observación —zoom, escala gráfica, velocidad de presentación— y de los controles musicales —registro, mezcla, envolvente o timbre—. Esta separación reduce la ambigüedad de atribuir un cambio audible a una causa equivocada.

2.2. Cinco métodos nativos

La clasificación de MEC no pretende reemplazar taxonomías generales de sonificación. Es una taxonomía de diseño para decidir qué dimensión del fenómeno debe ocupar el primer plano auditivo.

- **AUD — audificación.** Una trayectoria, señal o variable continua controla de manera directa o casi directa la señal sonora. Es apropiada cuando la continuidad temporal o la forma de onda constituye parte esencial del fenómeno.
- **EVT — eventos propios.** El fenómeno contiene ocurrencias discretas —impactos, cruces, nacimientos, avalanchas, adhesiones— que actúan como disparadores. El ritmo emerge del sistema, no de un secuenciador externo.
- **ORD — parámetro de orden.** Una variable colectiva resume coherencia, magnetización, polarización, condensación u otra transición macroscópica. Su evolución organiza tensión, consonancia, densidad o apertura tímbrica.

- **RES — resonadores o modos.** Los modos propios, longitudes de onda dominantes, nodos o espectros espaciales excitan bancos de resonadores. El resultado busca conservar relaciones modales antes que traducir cada celda individual.
- **DST — distribución o campo.** Una distribución espacial, densidad, fase o campo se proyecta sobre componentes sonoros simultáneos. El desafío principal es reducir dimensionalidad sin ocultar la estructura.

Las fronteras son permeables. Un espécimen puede combinar eventos secundarios con un parámetro de orden o añadir una voz resonante. El método nativo indica qué relación debe seguir siendo reconocible si se simplifica la instrumentación.

2.3. Gramática musical común y comparabilidad

Una gramática común no significa asignar los mismos acordes a todos los sistemas. Significa mantener convenciones estables: el registro grave representa escalas lentas o grandes; el registro agudo, escalas rápidas o pequeñas; la densidad sonora se relaciona con número de eventos o componentes activos; la consonancia relativa puede reflejar coherencia; y la panoramización sólo se usa cuando existe una coordenada o relación espacial defendible. Las seis octavas disponibles se tratan como un espacio de registro, no como una obligación de ocuparlo por completo.

Esta gramática ofrece una hipótesis comparativa: un oyente puede aprender una relación en un espécimen y transferir parte de esa expectativa a otro. Sin embargo, una convención musical puede imponer jerarquías culturales o psicoacústicas que el modelo no posee. MEC no equipara “consonante” con “bueno” ni “ruidoso” con “caótico”. La ficha de cada instrumento debe explicar qué variable se escucha, cómo se transforma y qué interpretación no está autorizada.

2.4. El navegador como laboratorio público

La Web Audio API define una arquitectura de procesamiento y síntesis basada en grafos de nodos de audio (World Wide Web Consortium [W3C], 2021). Junto con Canvas, SVG y JavaScript, permite ejecutar modelos, representar su estado, sintetizar sonido y registrar interacción sin instalar software especializado. Esta accesibilidad convierte el navegador en un medio de publicación y, simultáneamente, en una fuente de variabilidad: políticas de activación de audio, frecuencia de refresco, potencia de cómputo, suspensión de pestañas y dispositivos de salida pueden cambiar la experiencia.

El atlas adopta por ello una postura de laboratorio público, no de laboratorio metrológico. El navegador es suficiente para explorar relaciones, comparar comportamientos y producir registros; no garantiza sincronía de tiempo real duro ni precisión numérica idéntica entre plataformas. La reproducibilidad se apoya en metadatos de sesión, semillas, estados exportados y versiones del artefacto.

3. Materiales y métodos

3.1. Diseño del estudio

El trabajo combina investigación mediante diseño, ingeniería de software y auditoría de artefacto. La unidad de análisis es el **espécimen**, entendido como una página interactiva que contiene un modelo reducido o fenomenológico, una visualización, una sonificación, controles y una ficha científica. La colección completa es a la vez una obra digital y una infraestructura comparativa.

El proceso tuvo seis etapas: (a) consolidación de una nómina canónica; (b) clasificación por familia y método nativo; (c) reconstrucción profunda de instrumentos prioritarios y creación de una capa causal compartida para el resto; (d) normalización de interfaz, seguridad auditiva, accesibilidad y exportaciones; (e) auditoría estática y dinámica; y (f) documentación de niveles de evidencia y pendientes. Los cambios se aplicaron de forma incremental para conservar especímenes heredados y distinguir mejoras de interfaz de modificaciones del modelo.

3.2. Corpus, familias y selección

La nómina canónica contiene 83 especímenes en 15 familias. La selección provino de un universo de 274 fenómenos existentes y candidatos, sometidos a criterios de relevancia conceptual, diversidad disciplinar, potencial de interacción, identidad visual y capacidad de sonificación sin depender exclusivamente de un barrido externo. El “filtro sin barrido” no prohíbe la exploración espacial; exige que el sistema posea una dinámica, un evento, un modo o un estado que pueda escucharse por derecho propio.

Cada entrada del catálogo registra archivo, nombre, subtítulo, familia, método, estado de nómina, nivel editorial, profundidad de implementación y estado de evidencia. Cincuenta y cuatro entradas procedían de la colección previa, 26 fueron altas nuevas y tres se reconstruyeron. Treinta y seis cuentan con implementación profunda específica; 47 emplean una capa causal por familia que normaliza la relación entre estado, controles y audio sin presentarse como reemplazo de un modelo científico completo.

Familia	n	Métodos nativos	Profundos
Caos y sistemas dinámicos	8	AUD 6 · EVT 2	1
Autómatas y emergencia	9	EVT 5 · ORD 4	4
Morfogénesis y medios excitables	7	EVT 3 · ORD 1 · RES 3	2
Sincronía y redes	5	EVT 1 · ORD 4	4
Fractales	2	EVT 2	0
Acústica y ondas	7	AUD 2 · ORD 1 · RES 4	2
Materia activa y colectivos	4	EVT 3 · ORD 1	4
Biología y vida	3	EVT 1 · ORD 1 · RES 1	2
Geociencias y clima	4	AUD 1 · EVT 1 · ORD 2	4
Mecánica celeste	8	AUD 3 · EVT 4 · ORD 1	3
Cuántica	5	ORD 3 · DST 2	1
Óptica	5	EVT 1 · ORD 2 · DST 2	2
Fluidos	6	AUD 1 · EVT 3 · ORD 1 · RES 1	3
Electromagnetismo y plasma	6	AUD 1 · EVT 5	3
Gramática musical (familia-puente declarada)	4	EVT 3 · ORD 1	1

3.3. Anatomía normalizada del espécimen

La interfaz final organiza el visor y los controles como dos zonas simultáneamente visibles y centradas en la pantalla. La columna instrumental incluye un transporte explícito, volumen, estado de audio y protección de mezcla. Los controles se agrupan en cuatro planos: **Modelo**, **Observación**, **Sonido** y **Ficha**. Esta organización responde a fallos detectados durante el desarrollo: paneles sin función, controles fuera del primer pantallazo, áreas vacías desproporcionadas, pérdida de movimiento al activar audio y remanentes gráficos al cambiar zoom o escala.

El panel **Modelo** contiene parámetros del fenómeno y acciones de reinicio. **Observación** modifica velocidad de presentación, zoom, escala y resolución temporal sin alterar indebidamente la dinámica. **Sonido** expone registro, octava, densidad, timbre, articulación, espacialización, polifonía y mezcla, según pertinencia. **Ficha** declara modelo, variables, mapeo, referencias, límites y nivel de evidencia. Los controles comunes deben existir en todos los especímenes; los controles específicos sólo se añaden si producen una consecuencia causal demostrable.

3.4. Arquitectura de estado compartido

La arquitectura lógica puede resumirse como una cadena de cinco capas. Primero, el **modelo** actualiza un estado numérico $x(t)$ bajo parámetros θ y semilla s . Segundo, un **extractor de descriptores** calcula un vector $d(t)$ —por ejemplo, energía, magnetización, velocidad media, curvatura, tamaño de avalancha o modo dominante—. Tercero, la visualización y la sonificación consumen el mismo $d(t)$ y el mismo sello temporal. Cuarto, los controles modifican explícitamente θ , la observación o el mapeo, nunca una categoría no declarada. Quinto, la sesión exporta parámetros, semilla, método, descriptores y eventos suficientes para reconstruir la interpretación.

Sea M el actualizador del modelo, V el renderizador visual, S el motor sonoro y E el exportador. La condición operacional de acoplamiento es:

$$x(t + \Delta t) = M(x(t), \theta, s); d(t) = D(x(t)); \text{imagen}(t) = V(d(t)); \text{audio}(t) = S(d(t)); \text{registro}(t) = E(d(t), \theta, s).$$

Esta formulación no exige que V y S usen todos los componentes de d , pero sí que todo descriptor musical declarado sea función del estado o de una interacción registrada. Un oscilador decorativo, desconectado de $x(t)$, puede formar parte de la identidad sonora sólo si se etiqueta como capa musical y no como evidencia del fenómeno.

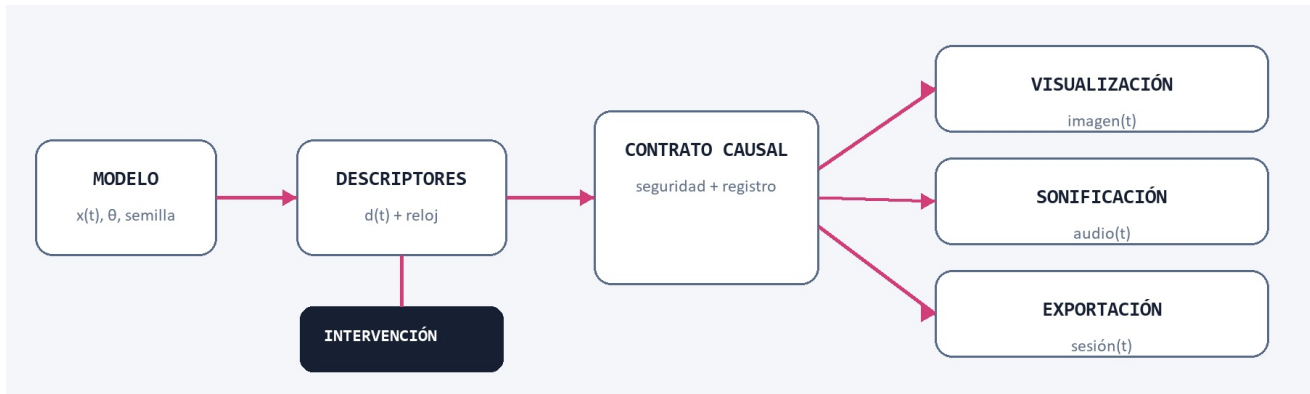


Figura 1. Arquitectura operacional de sonificación causal.

3.5. Transformación sonora

Las transformaciones usan normalización robusta, límites y escalas perceptivas. Una variable continua q se lleva a $[0, 1]$ mediante límites físicos, teóricos o empíricos declarados. Cuando controla frecuencia, la interpolación se realiza preferentemente en dominio logarítmico; cuando controla ganancia, se acota y suaviza para evitar saltos. Los eventos se agrupan o limitan cuando su tasa excede la polifonía disponible. Los parámetros de orden pueden actuar sobre intervalos, filtrado o densidad, pero la ficha debe evitar interpretaciones normativas.

La mezcla común incorpora ganancias acotadas, compresión dinámica y recorte suave. El diseño responde a saturaciones observadas en versiones tempranas de Filotaxis y otros instrumentos con eventos simultáneos. La protección no elimina la necesidad de calibración perceptiva: un limitador evita picos extremos, pero no garantiza confort, balance espectral ni ausencia de fatiga.

3.6. Interacción, reloj y continuidad

El transporte sonoro y el bucle visual comparten estado de ejecución, pero el acto de habilitar audio no debe detener el modelo. En navegadores, la creación o reanudación del contexto sonoro es asíncrona; si se acopla de manera incorrecta al bucle gráfico, puede reiniciar, bloquear o congelar la simulación. La implementación auditada separa la autorización del audio de la actualización del modelo y comprueba tres estados: movimiento antes de activar audio, movimiento mientras el audio está activo y presencia de evidencia de señal.

Los cambios de zoom y escala fuerzan una limpieza completa del búfer visual y una reconstrucción desde el estado vigente. Esta regla evita que transformaciones previas queden como remanentes. La transformación de observación se restablece antes de cada cuadro, se limpia la superficie completa y luego se aplica la nueva escala; el modelo no se reinicia

salvo petición explícita.

3.7. Reproducibilidad y exportaciones

La reproducibilidad computacional requiere conservar más que la salida final (Sandve et al., 2013). MEC registra, según el instrumento, nombre y versión, fecha, parámetros, método nativo, semilla, controles, eventos y notas. Las exportaciones MIDI representan eventos musicales cuantizados; JSON conserva el estado o la sesión; SVG conserva visualizaciones vectoriales cuando corresponde. Una exportación no prueba por sí sola la validez del mapeo, pero permite comparar lo escuchado con la configuración que lo produjo.

El proyecto adopta los principios FAIR como horizonte —encontrabilidad, accesibilidad, interoperabilidad y reutilización— sin declarar todavía cumplimiento pleno (Wilkinson et al., 2016). La página pública mejora acceso y descubrimiento; el catálogo estructurado y los archivos autocontenidos favorecen interoperabilidad limitada; la licencia explícita reutilización no comercial y compartir igual. Persisten pendientes de preservación: identificador persistente, depósito versionado, metadatos formales y huellas criptográficas por versión.

3.8. Niveles de evidencia

Para impedir que una interfaz pulida se confunda con validación, se definieron niveles incrementales:

Nivel	Nombre	Evidencia mínima	Estado actual
S1	Estructura estática verificada	archivo, sintaxis, interfaz y ficha detectables	toda la colección
C1	Validación computacional reproducible	prueba numérica o de escenarios registrada	seis representantes en catálogo
R1	Ejecución y audio en navegador	movimiento, continuidad y señal en entorno declarado	auditoría dinámica, sin equivaler a P1
A1	Sesión reproducible	estado y exportaciones reconstruibles	pendiente de cierre por espécimen
P1	Discriminación perceptiva	tarea humana con resultado evaluable	pendiente
V1	Validación interna	dictamen científico documentado por dominio	pendiente
V2	Revisión externa	revisión independiente formal	pendiente

Los niveles no se heredan por semejanza de familia. Un instrumento sólo avanza cuando existe evidencia fechada que corresponde a su propio modelo, mapeo y ejecución. En la versión documentada, toda la colección posee estructura verificada; seis representantes conservan evidencia computacional registrada en el catálogo. Las auditorías dinámicas globales posteriores amplían la evidencia de comportamiento de software, pero no promueven automáticamente los 83 instrumentos a validación perceptiva o científica.

3.9. Protocolo de auditoría

La auditoría estática verificó nómina, archivos, sintaxis, contrato de audio, presencia de controles, ficha, seis octavas, seguridad de mezcla, atributos de accesibilidad y ausencia de nombres ajenos a la nómina canónica. Para los 27 modelos nuevos o reconstruidos se ejecutaron pruebas de escenarios que variaron parámetros científicos y observaron cambios de estado. La auditoría dinámica cargó cada espécimen en navegador, registró errores de consola, midió movimiento visual antes y después de activar audio y buscó evidencia de señal sonora. Una ronda adicional probó limpieza y reconstrucción al cambiar zoom y escala.

Las pruebas automatizadas reducen errores repetitivos, pero tienen límites claros. Detectar un nodo de audio o energía de señal no demuestra que el sonido sea informativo. Detectar contraste por reglas programadas no sustituye una auditoría WCAG completa. Observar cambios numéricos no prueba fidelidad a literatura especializada. Por ello, el protocolo

produce evidencia de ingeniería y una lista de tareas para revisión humana.

4. Resultados

4.1. Composición del atlas

La colección alcanzó 83 especímenes distribuidos en 15 familias. EVT es el método más frecuente, con 34 instrumentos; le siguen ORD con 22, AUD con 14, RES con nueve y DST con cuatro. La distribución refleja la abundancia de sucesos discretos y transiciones en el corpus, pero también una decisión de diseño: evitar convertir cada sistema en un barrido espectral o en una melodía de alturas.

Código	Método	n	Proporción	Profundos
AUD	Audificación	14	16,9 %	7
EVT	Eventos propios	34	41,0 %	16
ORD	Parámetro de orden	22	26,5 %	11
RES	Resonadores o modos	9	10,8 %	2
DST	Distribución o campo	4	4,8 %	0

DISTRIBUCIÓN POR MÉTODO NATIVO

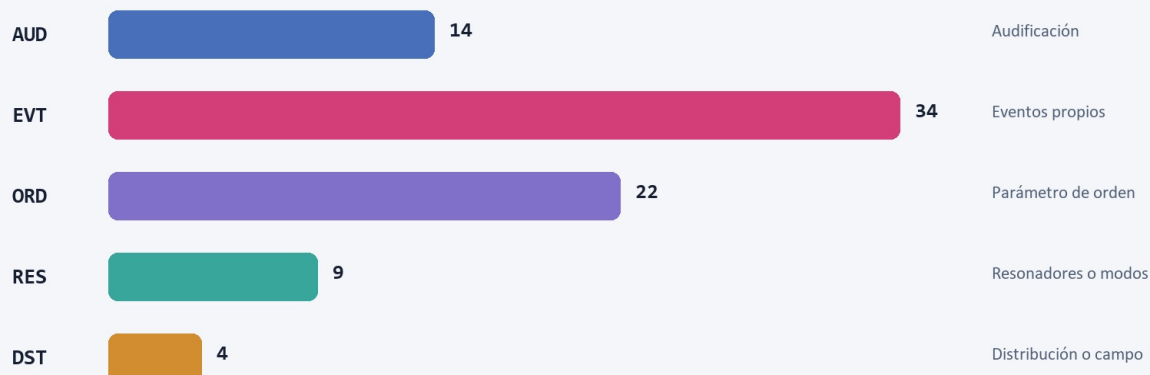


Figura 2. Distribución de los 83 especímenes por método nativo.

La familia más numerosa es mecánica celeste con ocho especímenes, mientras que varias familias contienen entre cuatro y siete. Fractales tiene dos, una escala deliberadamente pequeña que evita inflar el atlas con variaciones visuales del mismo principio. La familia “Gramática musical” funciona como puente declarado: no se presenta como fenómeno natural, sino como conjunto de estructuras que hace explícitos ritmo, métrica, armonía y generación.

4.2. Cobertura estructural y científica

Las pruebas de colección verificaron los 83 archivos canónicos, su pertenencia a una familia y la correspondencia entre catálogo e índice. Los 83 instrumentos incluyen el contrato común de audio y un registro de seis octavas. En la cohorte de 27 altas o reconstrucciones se probaron 162 escenarios —seis por modelo en promedio— y 81 controles científicos causales. Este resultado es importante porque la simple presencia de un deslizador había generado falsos positivos en auditorías anteriores; la versión revisada exige que el control produzca un cambio observable en el estado o en descriptores derivados.

La revisión metodológica contabilizó 256 descriptores de mapeo en el conjunto. Parte de los descriptores heredados requiere todavía normalización semántica: la implementación puede funcionar aunque la explicación no identifique con suficiente precisión dato de origen, transformación y resultado perceptible. Se conserva esta distinción entre “mapeo ejecutable” y “mapeo bien documentado”.

4.3. Comportamiento en navegador

La ronda dinámica de la versión estabilizada observó movimiento en reposo, continuidad de movimiento al habilitar el audio y evidencia de señal sonora en 83/83 especímenes. No se registraron errores ni advertencias de consola en la configuración ensayada. Una prueba específica de transformaciones verificó los 27 modelos de la cohorte nueva o reconstruida y Pilotaxis, sin remanentes persistentes después de cambios de zoom o escala.

Estos resultados corrigen dos clases de fallo de alta severidad detectadas durante el desarrollo: instrumentos que no emitían sonido y modelos cuyo movimiento se detenía al pulsar reproducción. También corrigen un fallo visual transversal: el lienzo se transformaba acumulativamente y dejaba rastros de escalas anteriores. La solución se generalizó mediante restablecimiento de transformaciones y limpieza total antes de cada renderizado.

4.4. Interfaz, disposición y accesibilidad

La normalización final mantiene visor y controles en una composición central, con márgenes laterales equilibrados cuando sobra ancho. El panel de control permanece a la derecha para permitir manipulación sin ocultar el fenómeno. El tamaño del visor se limita por altura de pantalla y el contenido secundario se organiza en pestañas o secciones plegables. Esta geometría surgió de iteraciones directas sobre capturas a 1280×720 y 1920×1080 , donde versiones previas dejaban hasta un tercio de la pantalla sin función o situaban controles fuera del área visible.

La auditoría automatizada de accesibilidad revisó 84 documentos —el índice y los 83 especímenes— y no encontró incumplimientos dentro de los criterios programados. La colección incluye región principal, salto al contenido, nombres accesibles, foco visible, control de movimiento reducido y manejo de foco en diálogos. El resultado no constituye certificación WCAG 2.1 AA: faltan pruebas humanas con lector de pantalla, navegación completa por teclado, ampliación 200–400 %, percepción en mono y evaluación de confort auditivo.

4.5. Profundidad y alcance de las implementaciones

Treinta y seis instrumentos poseen reconstrucción profunda específica. Cuarenta y siete dependen de una capa causal por familia. Esta estrategia permitió uniformar la colección sin afirmar que los 83 modelos tengan el mismo nivel de detalle. Las fichas señalan cuándo una implementación es reducida o fenomenológica, en especial en modelos de alta complejidad computacional como Navier–Stokes, auroras, ondas sísmicas, Physarum o ciertos fenómenos cuánticos.

La arquitectura común aporta continuidad de interfaz, controles, seguridad y exportación. Su riesgo es que una capa por familia oculte diferencias internas. Por ello, el estado de evidencia y la profundidad se registran por archivo, no sólo por familia. La tabla completa de especímenes aparece en el Apéndice A.

4.6. Cobertura bibliográfica

La extracción de fichas científicas recuperó referencias declaradas por los 83 especímenes, incluidas cuatro bibliografías preservadas en una capa de compatibilidad histórica. Tras eliminar duplicados exactos y variantes evidentes, el corpus consolidado reúne 140 entradas bibliográficas. La calidad de metadatos es desigual: una parte contiene DOI, volumen y páginas; otra conserva citas breves de autor, año y título. Se decidió no inventar datos faltantes. El Apéndice E presenta el corpus completo normalizado hasta donde permiten las fuentes originales y distingue la bibliografía metodológica central de la bibliografía específica del atlas.

5. Estudios de caso

5.1. Atractor de Lorenz: trayectoria, altura y cambio de lóbulo

El atractor de Lorenz funciona como espécimen de referencia para sistemas dinámicos. El modelo integra tres variables acopladas y produce una trayectoria que alterna entre dos lóbulos. La visualización y el sonido se alimentan de la misma trayectoria: la posición vertical controla registro, la velocidad contribuye a articulación o energía, y el cruce o cambio de lóbulo puede actuar como evento. La utilidad no reside en que el atractor “tenga” una melodía, sino en que continuidad, aceleración y permanencia local se vuelvan auditivamente distinguibles.

El caso expone una tensión de escala. Si cada punto dispara una nota, la densidad destruye la estructura; si se cuantiza en exceso, el resultado parece una melodía convencional que oculta la dinámica. La solución combina una voz continua o audificada con eventos menos frecuentes. La ficha aclara que la cuantización musical es una capa de observación. El catálogo conserva para este instrumento evidencia computacional representativa, pero la interpretación perceptiva del cambio de régimen requiere todavía pruebas con participantes.

5.2. Filotaxis: generaciones, parastiquias y polifonía selectiva

Filotaxis fue el espécimen de iteración más intensa. Su imagen surge de puntos sucesivos separados por un ángulo de divergencia cercano al ángulo áureo. Las familias de espirales visibles —parastiquias— dependen del ángulo, la escala radial y la cantidad de elementos. Versiones iniciales presentaban sonido débilmente conectado al movimiento, un visor sobredimensionado, controles dispersos y saturación ocasional.

La versión consolidada organiza los controles a la derecha y permite resaltar generaciones o familias de parastiquias. Esas selecciones no son sólo visuales: activan voces diferenciadas, registros y densidades proporcionales a las familias destacadas. El barrido angular se convierte en una trayectoria de exploración explícita, mientras que las generaciones primera, segunda, tercera y automática ofrecen puntos de escucha comparables. Se amplió el registro a seis octavas y se limitaron polifonía, ganancia y eventos simultáneos para conservar claridad.

Filotaxis ilustra el valor de la causalidad compartida. Cambiar el ángulo transforma simultáneamente la distribución espacial, las relaciones de vecindad y la estructura sonora. La escucha no certifica una identificación de números de Fibonacci, pero puede apoyar la exploración de cuándo una familia de espirales se estabiliza, se bifurca o pierde nitidez.

5.3. Lenia: vida artificial continua y remanentes de transformación

Lenia generaliza la lógica de autómatas celulares hacia estados continuos, vecindarios convolucionales y funciones de crecimiento. En el atlas, masa, actividad, cohesión y locomoción alimentan parámetros de orden y voces musicales. La interfaz separa velocidad y resolución temporal —que afectan el avance del modelo— de zoom y escala gráfica —que afectan la observación—.

Esta distinción permitió localizar un fallo: al modificar zoom o escala, la transformación del contexto gráfico se acumulaba y dejaba copias remanentes del patrón. La corrección restablece la matriz de transformación, limpia el lienzo y vuelve a dibujar el estado actual. El caso demuestra que una anomalía visual puede parecer un comportamiento emergente; en un atlas científico-artístico, eliminar esa ambigüedad es una condición epistemológica, no sólo estética.

5.4. Belousov–Zhabotinsky: frentes químicos como eventos

El espécimen Belousov–Zhabotinsky representa un medio excitable mediante una aproximación de reacción-difusión. Los frentes y espirales químicos poseen eventos propios: el paso de un frente por regiones de observación, la nucleación, la rotación y la colisión. En lugar de barrer la imagen de izquierda a derecha, el instrumento escucha esos eventos cuando ocurren.

El método EVT conserva la temporalidad del sistema y permite comparar tasas de excitación y organización. Los controles alteran alimentación, difusión o excitabilidad dentro de rangos reducidos; la ficha evita equiparar la implementación con una simulación química cuantitativa. Este equilibrio —evento causal, modelo reducido y límite visible— resume el criterio

editorial de la colección.

5.5. Ising: transición de fase y parámetro de orden

En el modelo de Ising, la magnetización global, la energía, la susceptibilidad aproximada y la frontera entre dominios ofrecen descriptores complementarios. La sonificación ORD usa la magnetización y el grado de orden para modificar densidad y estabilidad armónica, mientras eventos locales o cambios rápidos introducen articulación. Cerca de la temperatura crítica, la gráfica y el sonido muestran fluctuaciones más persistentes.

El caso advierte contra una metáfora simplista: una textura consonante no “demuestra” orden físico. Es una convención de mapeo que debe aprenderse y contrastarse con la ficha. La contribución del instrumento es permitir intervención continua sobre temperatura y agitación, escuchar transiciones y volver a condiciones comparables, no medir exponentes críticos con precisión.

6. Discusión

6.1. Aportes del atlas

MEC aporta una escala de colección inusual para una publicación web de sonificación: 83 instrumentos bajo una misma estructura, sin reducirlos a un único algoritmo musical. La taxonomía de cinco métodos funciona como herramienta de decisión. Preguntar si un fenómeno debe escucharse como señal, evento, orden, modo o distribución obliga a identificar qué estructura se considera informativa antes de diseñar timbre y estética.

El segundo aporte es arquitectónico. La unidad de estado entre modelo, imagen, audio y exportación responde a un problema frecuente en experiencias audiovisuales: la aparente sincronía puede ocultar dos sistemas independientes. El contrato causal no elimina el juicio interpretativo, pero hace auditable dónde se produce. Un revisor puede seguir la variable desde el modelo hasta el descriptor, el mapeo y el resultado sonoro.

El tercer aporte es editorial. La ficha científica, los niveles de evidencia y las limitaciones visibles tratan la interfaz como parte de la argumentación. El usuario no debería tener que abrir el código para saber si observa una simulación reducida, una analogía fenomenológica o una audificación directa. Esta transparencia es especialmente importante cuando el atractivo visual y musical puede producir una sensación de autoridad mayor que la evidencia disponible.

6.2. Comparación transdisciplinar

La gramática común permite escuchar analogías estructurales entre dominios: sincronización en osciladores y luciérnagas, criticalidad en arena e Ising, modos en cuerdas y patrones espaciales, eventos de umbral en láseres y percolación. Tales analogías son heurísticas, no identidades matemáticas. Su valor reside en formular preguntas y reconocer formas temporales; su riesgo es ignorar unidades, escalas y mecanismos distintos.

El atlas favorece una lectura comparativa porque conserva operaciones comunes: iniciar, detener, variar un parámetro científico, cambiar la observación, ajustar el registro y consultar el mapeo. El usuario puede atribuir diferencias a la estructura del instrumento con menor interferencia de cambios arbitrarios de interfaz. Esta consistencia también hace visibles los especímenes que necesitan un tratamiento singular: una distribución cuántica no debe forzarse a la misma estrategia que una secuencia de avalanchas.

6.3. Estética, información y legibilidad

Un sonido informativo no tiene que ser austero; una experiencia musical no tiene que renunciar a la trazabilidad. El desafío consiste en que la estética amplifique relaciones en vez de cubrirlas. La cuantización puede facilitar memoria y comparación, pero crea notas discretas donde había continuidad. La reverberación puede revelar densidad, pero también borrar eventos. La compresión protege la mezcla, aunque reduce contrastes de amplitud. Cada decisión musical es simultáneamente una decisión sobre información.

MEC adopta capas distinguibles. La **voz del fenómeno** depende de descriptores causales; la **gramática musical** organiza registro, escala y articulación; la **mezcla** protege y sitúa; y una eventual **capa expresiva** debe identificarse como tal. Esta separación conceptual puede apoyar futuras pruebas A/B: escuchar el mapeo desnudo, la versión musical y una condición decorativa desconectada permitiría estudiar qué información se conserva.

6.4. Evidencia técnica frente a evidencia perceptiva

La prueba de 83/83 sonidos y movimientos es una condición de publicación, no una conclusión científica. Demuestra que el botón funciona, que el bucle continúa y que se produce señal. No demuestra que un oyente identifique variables, compare regímenes o comprenda causalidad. Del mismo modo, 162 escenarios confirman respuesta del software a parámetros, pero no fidelidad cuantitativa a cada campo disciplinar.

La validación perceptiva debería formular tareas concretas: discriminar dos estados, ordenar magnitudes, detectar una transición o reconstruir una relación. Debe comparar modalidades —visual, auditiva y audiovisual— y medir precisión, tiempo, confianza y carga. La evaluación estética puede acompañar, pero no sustituir esas tareas. La revisión externa, por su parte, debe ser específica por dominio; un especialista en dinámica no valida automáticamente una implementación de mecánica cuántica.

6.5. Accesibilidad multimodal

La sonificación suele presentarse como ampliación de acceso, pero puede crear barreras nuevas. Una interfaz que depende de color, puntero fino o audio estéreo excluye a usuarios distintos. MEC incorpora foco, nombres, teclado, movimiento reducido y fichas textuales; aún necesita pruebas humanas. También debe evitar afirmar que el sonido “reemplaza” la imagen: la accesibilidad robusta requiere redundancia semántica, control de volumen, compatibilidad mono, subtítulos descriptivos de eventos y formas de inspeccionar valores.

6.6. Ciencia abierta y preservación

La publicación como sitio estático reduce dependencias y facilita copia, pero una URL viva no basta para citar una versión. El siguiente paso es depositar una instantánea con número de versión, licencia, manifiesto de archivos y DOI. Los datos de auditoría, el catálogo y las sesiones de ejemplo deberían publicarse en formatos legibles por máquina. Las referencias de cada espécimen requieren completar metadatos y, cuando sea posible, enlaces persistentes.

7. Limitaciones

Primero, los modelos tienen profundidades desiguales. Las reconstrucciones específicas coexisten con aproximaciones familiares y modelos fenomenológicos. La ficha reduce el riesgo de confusión, pero no convierte aproximaciones en simulaciones de investigación.

Segundo, la mayor parte de la evidencia es técnica. No se ha completado una evaluación perceptiva con participantes para la colección actual, ni existe revisión científica externa formal de los 83 especímenes. El manuscrito no usa los términos “validado” o “demostrado” para resultados que dependen de esas etapas.

Tercero, las pruebas dinámicas corresponden a una configuración de navegador, pantalla y sistema. Variaciones de temporización, rendimiento y audio pueden afectar otros entornos. Se requieren matrices de compatibilidad, dispositivos móviles y pruebas de larga duración.

Cuarto, la gramática musical usa convenciones culturales y psicoacústicas que no son neutrales. La asociación entre altura, tamaño, velocidad, orden o tensión debe investigarse y permitir alternativas. La disponibilidad de seis octavas aumenta expresividad, pero también puede perjudicar legibilidad o confort.

Quinto, el corpus bibliográfico hereda metadatos incompletos de fichas históricas. Este artículo consolida todas las entradas encontradas y corrige duplicados evidentes, pero no añade datos no verificados. Una curaduría bibliográfica disciplinar sigue pendiente.

Sexto, la ausencia de hallazgos automatizados de accesibilidad no equivale a conformidad certificada. Las experiencias sonoras requieren evaluación de fatiga, sensibilidad auditiva, navegación no visual y contenido alternativo.

8. Programa de trabajo futuro

- 1 **Validación perceptiva preregistrada.** Seleccionar representantes de AUD, EVT, ORD, RES y DST; definir hipótesis de discriminación y comparación; publicar materiales, análisis y resultados, incluidos resultados nulos.
- 2 **Revisión científica distribuida.** Convocar especialistas por familia, documentar observaciones y versionar correcciones sin exigir un único revisor enciclopédico.
- 3 **Calibración auditiva.** Medir sonoridad integrada, picos, balance espectral y confort en auriculares y altavoces; crear un modo de escucha segura y una referencia de nivel.
- 4 **Accesibilidad humana.** Probar teclado, lector de pantalla, zoom 400 %, alto contraste, movimiento reducido, mono y descripciones textuales de eventos.
- 5 **Preservación.** Depositar versiones citablemente congeladas, emitir DOI, conservar manifiestos y publicar un historial de cambios por espécimen.
- 6 **Bilingüismo y metadatos.** Completar interfaz, fichas y paper en español e inglés; añadir metadatos schema.org, citas descargables y ORCID cuando el autor lo disponga.
- 7 **Instrumentación comparativa.** Incorporar sesiones espejo entre fenómenos estructuralmente análogos y permitir superposición controlada de descriptores.
- 8 **Curaduría bibliográfica.** Verificar cada referencia contra su fuente primaria, completar DOI y paginación y separar fundamentos del fenómeno, del método numérico y de la sonificación.

9. Conclusión

Música en el Caos demuestra que un atlas sonoro de gran escala puede conservar diversidad disciplinar y, al mismo tiempo, ofrecer una interfaz y una gramática comparables. Su aporte principal es convertir la relación entre modelo y sonido en una obligación explícita: lo que se escucha debe poder rastrearse al mismo estado que se ve, y toda intervención debe declarar qué capa modifica.

La colección está técnicamente preparada para exploración pública y revisión controlada. Las pruebas confirman integridad de archivos, controles, ejecución, continuidad audiovisual, protección de mezcla y transformaciones en el entorno ensayado. No autorizan todavía afirmaciones de eficacia perceptiva o validez científica externa. Mantener esa frontera visible fortalece, en vez de debilitar, el proyecto: transforma una obra atractiva en una plataforma criticable, reproducible y abierta a investigación.

El atlas propone una forma de escuchar la complejidad sin convertirla en una banda sonora. Cada instrumento es una hipótesis sobre qué relación puede volverse audible; el conjunto es un laboratorio para comparar esas hipótesis. La publicación de este manuscrito, el código, las fichas, las auditorías y la bibliografía busca que la siguiente etapa no sea sólo añadir más fenómenos, sino producir mejor evidencia sobre lo que la escucha permite conocer.

Declaraciones

Ética

Este estudio documenta software y no incluyó participantes humanos, datos personales, animales ni intervención clínica. Las futuras pruebas perceptivas deberán contar con consentimiento informado, protección de datos y revisión ética proporcional al contexto institucional aplicable.

Disponibilidad de materiales

La versión pública del atlas está disponible en musicaenelcaos.cl. El paquete contiene páginas estáticas, catálogo, contratos, auditorías y exportaciones. Para reproducibilidad académica completa sigue pendiente un depósito versionado con identificador persistente.

Financiación

No se declara financiación externa para el desarrollo documentado en este manuscrito.

Conflictos de interés

El autor declara ser creador y titular del proyecto *Música en el Caos*. No se declaran otros conflictos de interés.

Contribuciones de autoría (CRediT)

Fernando Rodríguez Cortés: conceptualización, metodología, software, validación, investigación, curaduría de datos, visualización, composición sonora, diseño de interfaz, redacción del borrador, revisión y edición, administración del proyecto.

Asistencia de inteligencia artificial

Se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo para depuración de código, estructuración editorial, normalización de documentación y automatización de pruebas. El autor revisó las decisiones, conserva la responsabilidad sobre el contenido y no considera a estas herramientas autoras.

Licencia

El manuscrito, el código, los instrumentos, los textos, las gráficas y el diseño se publican bajo CC BY-NC-SA 4.0, salvo materiales de terceros sujetos a sus propias condiciones.

Referencias metodológicas

- Dubus, G., & Bresin, R. (2013). A systematic review of mapping strategies for the sonification of physical quantities. *PLOS ONE*, 8(12), e82491. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082491>
- Hermann, T. (2008). Taxonomy and definitions for sonification and auditory display. In *Proceedings of the 14th International Conference on Auditory Display (ICAD 2008)*. International Community for Auditory Display. <https://www.icad.org/Proceedings/2008/Hermann2008.pdf>
- Hermann, T., Hunt, A., & Neuhoﬀ, J. G. (Eds.). (2011). *The sonification handbook*. Logos Verlag Berlin. <https://sonification.de/handbook/>
- Kramer, G., Walker, B. N., Bonebright, T., Cook, P. R., Flowers, J. H., Miner, N., & Neuhoﬀ, J. G. (1999). *Sonification report: Status of the field and research agenda*. International Community for Auditory Display. <https://digitalcommons.unl.edu/psychfacpub/444/>
- Sandve, G. K., Nekrutenko, A., Taylor, J., & Hovig, E. (2013). Ten simple rules for reproducible computational research. *PLOS Computational Biology*, 9(10), e1003285. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003285>
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.-W., da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., ... Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3, 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- World Wide Web Consortium. (2021). *Web Audio API* (W3C Recommendation, 17 June 2021). <https://www.w3.org/TR/webaudio-1.0/>

Apéndice A. Inventario canónico de los 83 especímenes

Nº	Espécimen	Familia	Método	Estado	Profundidad	Refs.
1	Atractor de Lorenz	Caos y sistemas dinámicos	AUD	E	profunda	3
2	Péndulo doble	Caos y sistemas dinámicos	AUD	E	capa familiar	2
3	Rössler	Caos y sistemas dinámicos	AUD	E	capa familiar	2
4	Van der Pol	Caos y sistemas dinámicos	AUD	E	capa familiar	1
5	Mapa logístico	Caos y sistemas dinámicos	EVT	E	capa familiar	1
6	Chua	Caos y sistemas dinámicos	AUD	E	capa familiar	1
7	Duffing	Caos y sistemas dinámicos	AUD	E	capa familiar	1
8	Hénon	Caos y sistemas dinámicos	EVT	E	capa familiar	1
9	Juego de la Vida	Autómatas y emergencia	EVT	E	profunda	2
10	Boids	Autómatas y emergencia	ORD	E	profunda	2
11	Regla de Wolfram	Autómatas y emergencia	EVT	E	capa familiar	3
12	Hormiga de Langton	Autómatas y emergencia	EVT	E	capa familiar	3
13	Montón de arena	Autómatas y emergencia	EVT	E	capa familiar	3
14	Segregación de Schelling	Autómatas y emergencia	ORD	E	capa familiar	2
15	Red de Hopfield	Autómatas y emergencia	ORD	E	capa familiar	2
16	Lenia	Autómatas y emergencia	ORD	N	profunda	1
17	Olami–Feder–Christensen	Autómatas y emergencia	EVT	N	profunda	1
18	Turing	Morfogénesis y medios excitables	RES	E	profunda	4
19	Belousov–Zhabotinsky	Morfogénesis y medios excitables	EVT	N	capa familiar	3
20	Gray–Scott	Morfogénesis y medios excitables	RES	E	capa familiar	2
21	Swift–Hohenberg	Morfogénesis y medios excitables	RES	E	capa familiar	2
22	Ising	Morfogénesis y medios excitables	ORD	E	capa familiar	2
23	Percolación	Morfogénesis y medios excitables	EVT	E	capa familiar	2
24	Agregación limitada por difusión	Morfogénesis y medios excitables	EVT	N	profunda	1
25	Kuramoto	Sincronía y redes	ORD	E	profunda	3
26	Relojes de Huygens	Sincronía y redes	ORD	E	capa familiar	2
27	Estados quimera	Sincronía y redes	ORD	N	profunda	2
28	Luciérnagas / integrate-and-fire	Sincronía y redes	EVT	N	profunda	1
29	Sincronización explosiva	Sincronía y redes	ORD	N	profunda	1
30	Mandelbrot	Fractales	EVT	E	capa familiar	3
31	Julia	Fractales	EVT	E	capa familiar	3
32	Cuerda	Acústica y ondas	AUD	E	profunda	3
33	Cimática	Acústica y ondas	RES	E	profunda	3
34	Ondas estacionarias	Acústica y ondas	RES	E	capa familiar	2
35	Tubo de Kundt	Acústica y ondas	RES	E	capa familiar	2
36	Doppler	Acústica y ondas	AUD	E	capa familiar	2
37	Mathieu	Acústica y ondas	ORD	E	capa familiar	2
38	Faraday	Acústica y ondas	RES	E	capa familiar	2
39	Modelo de Vicsek	Materia activa y colectivos	ORD	N	profunda	1
40	Red de Physarum	Materia activa y colectivos	EVT	N	profunda	1

Nº	Espécimen	Familia	Método	Estado	Profundidad	Refs.
41	Hormigas: forrajeo estigmérico	Materia activa y colectivos	EVT	N	profunda	1
42	Nemáticos activos	Materia activa y colectivos	EVT	N	profunda	1
43	Filotaxis	Biología y vida	RES	N	capa familiar	3
44	Espirales cardíacas	Biología y vida	EVT	N	profunda	2
45	Reloj segmentario embrionario	Biología y vida	ORD	N	profunda	1
46	Ondas sísmicas P, S y superficiales	Geociencias y clima	AUD	N	profunda	1
47	Ríos meandriformes	Geociencias y clima	EVT	N	profunda	1
48	Circulación termohalina	Geociencias y clima	ORD	N	profunda	1
49	Ciclo ENSO	Geociencias y clima	ORD	N	profunda	1
50	Ondas gravitacionales	Mecánica celeste	AUD	E	capa familiar	2
51	Órbitas	Mecánica celeste	EVT	E	profunda	2
52	Tres cuerpos restringido	Mecánica celeste	AUD	N	profunda	1
53	Rotación caótica de Hiperión	Mecánica celeste	AUD	N	profunda	1
54	Resonancia orbital	Mecánica celeste	EVT	E	capa familiar	2
55	Kozai–Lidov	Mecánica celeste	ORD	E	capa familiar	2
56	Lentes gravitacionales	Mecánica celeste	EVT	E	capa familiar	2
57	Precesión del perihelio	Mecánica celeste	EVT	E	capa familiar	2
58	Schrödinger	Cuántica	DST	E	capa familiar	2
59	Bose–Einstein	Cuántica	ORD	E	capa familiar	2
60	Fase de Berry	Cuántica	ORD	E	capa familiar	2
61	Aharonov–Bohm	Cuántica	DST	E	capa familiar	2
62	Oscilaciones de Rabi	Cuántica	ORD	N	profunda	1
63	Doble rendija	Óptica	DST	E	capa familiar	2
64	Fraunhofer	Óptica	DST	E	capa familiar	2
65	Cáusticas ópticas	Óptica	EVT	N	profunda	1
66	Láser: umbral y modos	Óptica	ORD	N	profunda	1
67	Sagnac	Óptica	ORD	E	capa familiar	2
68	Navier–Stokes / turbulencia	Fluidos	AUD	R	profunda	1
69	Convección de Bénard	Fluidos	RES	E	capa familiar	2
70	Rayleigh–Taylor	Fluidos	ORD	E	capa familiar	2
71	Soliton	Fluidos	EVT	E	capa familiar	2
72	Kelvin–Helmholtz	Fluidos	EVT	N	profunda	1
73	Anillos de vórtice	Fluidos	EVT	N	profunda	1
74	Auroras y partículas cargadas	Electromagnetismo y plasma	EVT	N	profunda	1
75	Cherenkov	Electromagnetismo y plasma	EVT	E	capa familiar	2
76	Compton	Electromagnetismo y plasma	EVT	E	capa familiar	2
77	Josephson	Electromagnetismo y plasma	EVT	E	capa familiar	2
78	Maxwell	Electromagnetismo y plasma	AUD	R	profunda	1
79	Efecto Hall cuántico	Electromagnetismo y plasma	EVT	R	profunda	1

Nº	Espécimen	Familia	Método	Estado	Profundidad	Refs.
80	Ritmos euclidianos	Gramática musical (familia-puente declarada)	EVT	E	profunda	2
81	Pulso y métrica	Gramática musical (familia-puente declarada)	EVT	E	capa familiar	2
82	Armonía	Gramática musical (familia-puente declarada)	ORD	E	capa familiar	2
83	Generativo	Gramática musical (familia-puente declarada)	EVT	E	capa familiar	2

Apéndice B. Taxonomía operacional de métodos

Código	Método	Dato principal	Resultado sonoro	Riesgo de diseño
AUD	Audificación	señal o trayectoria continua	frecuencia, amplitud, timbre o forma de onda	conservar continuidad y estabilidad numérica
EVT	Eventos propios	ocurrencias endógenas discretas	ataque, duración, altura, intensidad y posición	controlar ráfagas sin imponer reloj externo
ORD	Parámetro de orden	variable macroscópica colectiva	consonancia, densidad, filtro, registro o tensión	no convertir una convención musical en juicio físico
RES	Resonadores o modos	modo propio, nodo o longitud dominante	banco modal, parciales y resonancia	preservar razones modales y evitar enmascaramiento
DST	Distribución o campo	densidad, campo, fase o distribución	capas simultáneas, espectro y espacialización	reducir dimensión sin borrar estructura

Apéndice C. Matriz de verificación de la versión documentada

Comprobación	Resultado	Tipo	Alcance
Nómina y archivos canónicos	83/83	automatizada	integridad de colección
Estructura científica y de publicación	83/83	automatizada	presencia y consistencia
Contrato de audio y seis octavas	83/83	automatizada	controles y rangos detectables
Modelos nuevos o reconstruidos	27 modelos · 162 escenarios	automatizada	respuesta del estado
Controles científicos causales	81/81	automatizada	cambio observable por intervención
Accesibilidad estática	84/84 documentos · 0 hallazgos	automatizada	criterios programados, no certificación
Movimiento en reposo	83/83	navegador	actividad visual
Movimiento con audio activo	83/83	navegador	continuidad audiovisual

Comprobación	Resultado	Tipo	Alcance
Evidencia de señal sonora	83/83	navegador	producción de señal, no legibilidad
Errores o advertencias de ejecución	0	navegador	configuración ensayada
Cambio de zoom o escala	27/27 + Filotaxis	navegador	limpieza y redibujado
Validación perceptiva humana	0/83	pendiente	eficacia informativa
Revisión científica externa	0/83	pendiente	validez por dominio

Apéndice D. Requisitos mínimos por espécimen

- 1 Modelo o aproximación declarada, con límites visibles.
- 2 Estado numérico compartido por visualización y audio.
- 3 Transporte y volumen operativos sin detener la simulación.
- 4 Controles científicos separados de observación y sonido.
- 5 Registro de seis octavas con rango seguro y valor legible.
- 6 Polifonía, densidad, envolvente y espacialización cuando sean pertinentes.
- 7 Protección contra saturación mediante ganancias acotadas, compresión y limitación de ráfagas.
- 8 Limpieza total del lienzo después de cambios de zoom o escala.
- 9 Ficha científica con modelo, variables, mapeo, referencias, límites y evidencia.
- 10 Exportación de sesión o estado suficiente para repetición.
- 11 Teclado, foco visible, nombres accesibles y movimiento reducido.
- 12 Prueba en navegador de movimiento, audio y ausencia de errores.

Apéndice E. Bibliografía consolidada de los especímenes

Las siguientes entradas provienen de las fichas del atlas. Se han eliminado duplicados exactos y variantes evidentes. Se conserva el nivel de detalle disponible y no se inventan DOI, páginas ni editoriales ausentes. Esta sección es un inventario bibliográfico del artefacto y requiere una segunda curaduría disciplinar antes de una eventual presentación a revista.

- Abbott, B. P. et al. (2016). Observation of GW150914. Phys. Rev. Lett. 116, 061102.
- Abrams, D. M. & Strogatz, S. H. (2004). Chimera states for coupled oscillators. Physical Review Letters, 93, 174102.
- Aharonov, Y. & Bohm, D. (1959). Phys. Rev. 115, 485.
- Airy, G. (1835). Trans. Camb. Phil. Soc.
- Aki, K. & Richards, P. G. (2002). Quantitative Seismology. University Science Books.
- Amit, D. (1989). Modeling Brain Function. Cambridge Univ. Press.
- Bak, P. (1996). How Nature Works. Springer.
- Bak, P., Tang, C. & Wiesenfeld, K. (1987). Self-organized criticality. Phys. Rev. Lett. 59, 381.
- Barkley, D. (1991). A model for fast computer simulation of waves in excitable media. Physica D 49.
- Benjamin, T. B. & Ursell, F. (1954). Proc. R. Soc. Lond. A 225.
- Bennett, M. et al. (2002). Huygens's clocks. Proc. R. Soc. Lond. A 458.

- Berry, M. (1984). Quantal phase factors... Proc. R. Soc. Lond. A 392.
- Berry, M. V. & Upstill, C. (1980). Catastrophe optics: morphologies of caustics and their diffraction patterns. Progress in Optics, 18, 257–346.
- Bjorklund, E. (2003). The theory of rep-rate pattern generation.
- Born & Wolf (1999). Principles of Optics.
- Bravais, L. & Bravais, A. (1837). Essai sur la disposition des feuilles curvisériées.
- Bunimovich, L. & Troubetzkoy, S. (1992). Recurrence properties of Lorentz lattice gas cellular automata. J. Stat. Phys. 67.
- Chan, B. W.-C. (2019). Lenia — Biology of Artificial Life. Complex Systems, 28(3), 251–286.
- Chandrasekhar, S. (1961). Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. Oxford.
- Cherenkov, P. (1934). Dokl. Akad. Nauk SSSR.
- Chladni, E. F. F. (1802). Die Akustik. Breitkopf und Härtel.
- Chua, L. O., Matsumoto, T. (1983). The double scroll family. IEEE Trans. Circuits and Systems.
- Compton, A. H. (1923). Phys. Rev. 21, 483.
- Conway, J. H. (1970). The Game of Life. Scientific American (Martin Gardner).
- Cook, M. (2004). Universality in elementary cellular automata. Complex Systems 15.
- Cross, M. & Hohenberg, P. (1993). Pattern formation outside of equilibrium. Rev. Mod. Phys. 65, 851.
- Deneubourg, J.-L. et al. (1990). The self-organizing exploratory pattern of the Argentine ant. Journal of Insect Behavior, 3, 159–168.
- Dhar, D. (1990). Self-organized critical state of sandpile automaton models. Phys. Rev. Lett. 64, 1613.
- Doppler, C. (1842). Über das farbige Licht der Doppelsterne.
- Douady, A. & Hubbard, J. (1985). Étude dynamique des polynômes complexes. Publ. Math. Orsay.
- Douady, S. & Couder, Y. (1992). Phyllotaxis as a physical self-organized growth process. Phys. Rev. Lett. 68.
- Drazin, P. & Johnson, R. (1989). Solitons: an Introduction. Cambridge.
- Drazin, P. G. & Reid, W. H. (1981). Hydrodynamic Stability. Cambridge University Press.
- Duffing, G. (1918). Erzwungene Schwingungen bei veränderlicher Eigenfrequenz. Vieweg.
- Einstein, A. (1915). Erklärung der Perihelbewegung des Merkur. Sitzungsber. Preuss. Akad.
- Einstein, A. (1936). Lens-like action of a star. Science 84.
- Eisberg & Resnick (1985). Quantum Physics.
- Eno, B. (1996). Generative music (charla).
- Faraday, M. (1831). On a peculiar class of acoustical figures. Phil. Trans. R. Soc.
- Fletcher, N. H., Rossing, T. D. (1998). The Physics of Musical Instruments. Springer.
- Gajardo, A., Moreira, A. & Goles, E. (2002). Complexity of Langton's ant. Discrete Appl. Math. 117.
- Gómez-Gardeñes, J. et al. (2011). Explosive Synchronization Transitions in Scale-Free Networks. Physical Review Letters, 106, 128701.
- Grimmett, G. (1999). Percolation. Springer.
- Haken, H. (1985). Light, Vol. 2: Laser Light Dynamics. North-Holland.
- Hecht, E. (2017). Optics. Pearson.
- Henon, M. (1976). A two-dimensional mapping with a strange attractor. Communications in Mathematical Physics, 50, 69-77.
- Hermann, T. & Ritter, H. (2001). Listen to your data: Model-Based Sonification for Data Analysis. ICAD.
- Hermann, T., Hunt, A. & Neuhoﬀ, J. G. (eds.) (2011). The Sonification Handbook. Logos.
- Hopfield, J. J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. PNAS 79, 2554.

- Huygens, C. (1665). Correspondencia.
- Ikeda, S., Parker, G. & Sawai, K. (1981). Bend theory of river meanders. *Journal of Fluid Mechanics*, 112, 363–377.
- Jackson, J. D. (1998). *Classical Electrodynamics*, §13.
- Jenny, H. (1967). *Kymatik (Cymatics)*.
- Jin, F.-F. (1997). An Equatorial Ocean Recharge Paradigm for ENSO. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 54, 811–829.
- Josephson, B. (1962). *Phys. Lett.* 1, 251.
- Julia, G. (1918). Mémoire sur l'itération des fonctions rationnelles. *J. Math. Pures Appl.*
- Karma, A. (1994). Electrical alternans and spiral wave breakup in cardiac tissue. *Chaos*, 4, 461–472.
- Karplus, K. & Strong, A. (1983). Digital Synthesis of Plucked-String and Drum Timbres. *Computer Music Journal*, 7(2).
- Kepler, J. (1619). *Harmonices Mundi*.
- Ketterle, W. (2002). Nobel Lecture. *Rev. Mod. Phys.* 74.
- Kozai, Y. (1962). Secular perturbations of asteroids. *AJ* 67.
- Kundt, A. (1866). Über eine neue Art akustischer Staubfiguren. *Ann. Phys.*
- Kuramoto, Y. (1984). *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*. Springer.
- Kuramoto, Y. & Battogtokh, D. (2002). Coexistence of coherence and incoherence in nonlocally coupled phase oscillators. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 5, 380–385.
- Lagrange, J. L. (1788). *Mécanique analytique*.
- Landau & Lifshitz. *Mechanics* (§27, resonancia paramétrica).
- Langton, C. (1986). Studying artificial life with cellular automata. *Physica D* 22, 120-149.
- Langton, C. G. (ed.) (1989). *Artificial Life*. Addison-Wesley.
- Large, E. & Jones, M. (1999). The dynamics of attending. *Psychol. Rev.*
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130–141.
- Lysak, R. L. & Song, Y. (2002). Energetics of the ionospheric feedback interaction. *Journal of Geophysical Research*, 107(A8).
- Maggiore, M. (2008). *Gravitational Waves*, Vol. 1. Oxford.
- Mandelbrot, B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman.
- Martins, A. C. G. et al. (1996). Auditory Display and Sonification of Textured Image. *ICAD*.
- May, R. M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261, 459-467.
- McLachlan, N. (1947). *Theory and Application of Mathieu Functions*. Oxford.
- Mirollo, R. E. & Strogatz, S. H. (1990). Synchronization of pulse-coupled biological oscillators. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 50, 1645–1662.
- Misner, Thorne & Wheeler (1973). *Gravitation*.
- Murray, C. & Dermott, S. (1999). *Solar System Dynamics*. Cambridge University Press.
- Murray, J. D. (2003). *Mathematical Biology II*. Springer.
- Naoz, S. (2016). The eccentric Kozai-Lidov effect. *ARA&A* 54.
- Newman, M. & Barkema, G. (1999). *Monte Carlo Methods in Statistical Physics*. Oxford.
- Nierhaus, G. (2009). *Algorithmic Composition*. Springer.
- Olami, Z., Feder, H. J. S. & Christensen, K. (1992). Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes. *Physical Review Letters*, 68, 1244–1247.
- Onsager, L. (1944). Crystal statistics I. *Phys. Rev.* 65, 117.
- Paczynski, B. (1986). Gravitational microlensing by the galactic halo. *ApJ* 304.

- Palmeirim, I. et al. (1997). Avian hairy gene expression identifies a molecular clock linked to vertebrate segmentation and somitogenesis. *Cell*, 91, 639–648.
- Peale, S. J. (1976). Orbital Resonances in the Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 14.
- Pearson, J. E. (1993). Complex patterns in a simple system. *Science*, 261, 189-192.
- Peitgen, H.-O. & Richter, P. (1986). *The Beauty of Fractals*. Springer.
- Pethick & Smith (2008). *BEC in Dilute Gases*. Cambridge.
- Pikovsky, Rosenblum & Kurths (2001). *Synchronization*. Cambridge Univ. Press.
- Post, E. (1967). Sagnac effect. *Rev. Mod. Phys.* 39.
- Rabi, I. I. (1937). Space Quantization in a Gyating Magnetic Field. *Physical Review*, 51, 652–654.
- Rameau, J.-P. (1722). *Traité de l'harmonie*.
- Rayleigh, Lord (1916). On convection currents... *Phil. Mag.* 32.
- Reynolds, C. W. (1987). *Flocks, Herds and Schools*. SIGGRAPH.
- Rossing, T. (2004). *The Science of Sound*. Addison-Wesley.
- Rossler, O. E. (1976). An equation for continuous chaos. *Physics Letters A*, 57(5), 397-398.
- Saffman, P. G. (1992). *Vortex Dynamics*. Cambridge University Press.
- Sagnac, G. (1913). *Comptes Rendus* 157.
- Sanchez, T. et al. (2012). Spontaneous motion in hierarchically assembled active matter. *Nature*, 491, 431–434.
- Schelling, T. (1971). Dynamic models of segregation. *J. Math. Sociology* 1, 143-186.
- Schelling, T. (1978). *Micromotives and Macrobehavior*. Norton.
- Schrödinger, E. (1926). Quantisierung als Eigenwertproblem. *Ann. Phys.*
- Sharp, D. (1984). An overview of Rayleigh-Taylor instability. *Physica D* 12.
- Smith, J. O. (2010). *Physical Audio Signal Processing*. W3K Publishing.
- Stauffer, D. & Aharony, A. (1994). *Introduction to Percolation Theory*. Taylor & Francis.
- Stommel, H. (1961). Thermohaline Convection with Two Stable Regimes of Flow. *Tellus*, 13, 224–230.
- Strogatz, S. (2000). From Kuramoto to Crawford. *Physica D* 143, 1-20.
- Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear Dynamics and Chaos*.
- Strogatz, S. H. (2015). *Nonlinear Dynamics and Chaos*. Westview Press.
- Swift, J. & Hohenberg, P. (1977). Hydrodynamic fluctuations at the convective instability. *Phys. Rev. A* 15, 319.
- Szebehely, V. (1967). *Theory of Orbits: The Restricted Problem of Three Bodies*. Academic Press.
- Taylor, G. I. (1950). *Proc. R. Soc. Lond. A* 201.
- Tero, A. et al. (2010). Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design. *Science*, 327, 439–442.
- Tinkham, M. (1996). *Introduction to Superconductivity*.
- Tomomura, A. et al. (1986). *Phys. Rev. Lett.* 56.
- Toussaint, G. (2005). The Euclidean algorithm generates traditional musical rhythms.
- Toussaint, G. (2013). *The Geometry of Musical Rhythm*. CRC Press.
- Turing, A. M. (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 237, 37-72.
- Tymoczko, D. (2011). *A Geometry of Music*. Oxford.
- van der Pol, B. (1927). Frequency demultiplication. *Nature*, 120, 363-364.
- Verplank, B., Mathews, M. & Shaw, R. (2000). Scanned Synthesis. *Proceedings of the International Computer Music Conference*.

- Vicsek, T. et al. (1995). Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles. *Physical Review Letters*, 75, 1226–1229.
- Visscher, P. (1991). A fast explicit algorithm for the time-dependent Schrödinger equation. *Comput. Phys.* 5.
- Vogel, H. (1979). A better way to construct the sunflower head. *Mathematical Biosciences* 44.
- von Klitzing, K., Dorda, G. & Pepper, M. (1980). New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance. *Physical Review Letters*, 45, 494–497.
- Wilczek & Shapere (1989). *Geometric Phases in Physics*.
- Williamson, C. H. K. (1996). Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28, 477–539.
- Winfree, A. T. (1972). Spiral waves of chemical activity. *Science* 175.
- Winfree, A. T. (1987). *When Time Breaks Down*. Princeton University Press.
- Wisdom, J., Peale, S. J. & Mignard, F. (1984). The chaotic rotation of Hyperion. *Icarus*, 58, 137–152.
- Witten, T. A. & Sander, L. M. (1981). Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon. *Physical Review Letters*, 47, 1400–1403.
- Wolfram, S. (1983). Statistical mechanics of cellular automata. *Rev. Mod. Phys.* 55, 601.
- Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Wolfram Media.
- Yee, K. S. (1966). Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 14, 302–307.
- Young, T. (1804). Experiments and calculations relative to physical optics.
- Zabusky, N. & Kruskal, M. (1965). Interaction of solitons... *Phys. Rev. Lett.* 15.
- Zhabotinsky, A. M. (1964). Periodical oxidation of malonic acid in solution. *Biofizika* 9.

Apéndice F. Nomenclatura y lectura de la ficha

Estado de nómina. E indica un espécimen heredado; N, una alta nueva; R, una reconstrucción de modelo existente.

Profundidad. “Profunda” indica implementación específica; “capa familiar” indica uso de la arquitectura causal compartida con parámetros del dominio. **Método nativo.** AUD, EVT, ORD, RES o DST identifica la relación auditiva principal, aunque existan voces secundarias. **Nivel editorial.** S, A, B, C y D expresan prioridad o asombro curatorial; no son niveles de evidencia. **Evidencia.** S1–V2 expresa el tipo de comprobación alcanzada y nunca debe confundirse con el nivel editorial.

Historial de versión del manuscrito

1.0 — 6 de agosto de 2026. Primera edición extensa: definición operacional, método, resultados de auditoría, cinco casos, declaraciones, inventario completo y bibliografía consolidada.