

VISUALIZACIÓN DE DATOS: CAMINOS DE IDA Y VUELTA ENTRE ARTE Y CIENCIA EN LA PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE IMÁGENES

Data visualization: pathways between art and science in the production and consumption of images

Dr. Roberto THERÓN SÁNCHEZ
Catedrático de la Universidad de Salamanca, España
E-mail: theron@usal.es
 <https://orcid.org/0000-0001-6739-8875>

Fecha de recepción del artículo: 8/10/2021
Fecha de aceptación definitiva: 13/10/2021

RESUMEN

El análisis de datos ha recurrido a la representación visual para encontrar u ofrecer explicaciones desde sus orígenes. Las capacidades de almacenamiento y procesamiento no han parado de crecer gracias al avance de la computación. Paralelamente, gracias a una democratización tecnológica, las contribuciones artísticas en la visualización de datos se han multiplicado, aportando nuevas formas creativas y planteamientos diferentes a los propios de la ciencia. Este artículo analiza las influencias recíprocas entre las artes y las ciencias en torno a las visualizaciones de datos. Se traza una visión panorámica de la Visualización de Datos mediante un análisis de la dedicación en las diversas disciplinas a este tema de estudio recogido en las principales bases de datos bibliográficas, así como de la creciente comunidad de práctica que acoge en la actualidad a científicos, diseñadores, artistas y otros perfiles profesionales. A través de una serie de ejemplos históricos que van desde la prehistoria hasta la actualidad, se ponen de manifiesto diversas líneas de influencia en las que arte y ciencia han propiciado avances en la comunicación de fenómenos o el planteamiento de preguntas a partir de los datos. Finalmente, se ofrecen unas reflexiones sobre los retos que afronta la Visualización de Datos y las oportunidades que de ellos se derivan.

Palabras clave: Visualización de datos; artes visuales; ciencia; tecnología; comunicación.

ABSTRACT

Since its origins, data analysis has turned to visual representation to find and offer explanations. Storage and processing capacities are steadily growing thanks to the advancement of computing. At the same time, thanks to technological democratization, artistic contributions in data visualization have multiplied, providing new creative forms and different approaches from those of science. This article looks at the reciprocal influences between the arts and sciences around data visualizations. We present a panoramic view of Data Visualization through an analysis of both the dedication in the various disciplines to this topic collected in the primary bibliographic databases and the growing community of practice that currently welcomes scientists, designers, artists and other professional

profiles. Through a series of historical examples ranging from prehistory to the present, we discuss various lines of influence in which art and science have led to advances in the communication of phenomena or the posing of questions based on data. Finally, we offer some reflections on the challenges that Data Visualization faces, and the opportunities derived from them.

Key words: Data visualization; visual arts; science; technology; communication.

1. Introducción

La Visualización de Datos (VD) es un área de investigación que se ha consolidado fuertemente en la última década. A pesar de que, como veremos, sus orígenes son tan antiguos como el hombre, se puede afirmar que las contribuciones de la VD tienen al comienzo de la segunda década del siglo XXI un impacto global, prácticamente en todas las ramas del saber y en la mayoría de las actividades cotidianas de las personas.

Tradicionalmente, las técnicas de visualización de datos se han desarrollado principalmente en áreas de ciencia (biología, medicina, astronomía, estadística), y estaban principalmente orientadas a permitir a usuarios expertos la exploración y el análisis de datos de forma rápida y precisa (Azzam et al., 2013; Friendly, 2008; Friendly y Wainer, 2021; Meyer, 2013). El impulso definitivo para la VD ha sido la cantidad y complejidad de datos de índole científica que ha seguido creciendo como resultado de los avances tecnológicos en el rendimiento computacional y la capacidad de almacenamiento (Chittaro, 2001). Paralelamente, la disponibilidad de conjuntos de datos abiertos y de software para visualización de datos ha propiciado que artistas y diseñadores creen visualizaciones de datos con otros fines fuera del ámbito científico, que, además, tienen como público objetivo distintos grupos de usuarios legos (Quispel et al., 2018).

Más allá del uso de la VD como una herramienta para la producción de imágenes útiles o necesarias para la práctica en diversos dominios, recientemente la propia VD se ha convertido en objeto de estudio desde la perspectiva de las diferentes disciplinas, como es el caso de las ciencias de la comunicación (Cavaller, 2021) o el diseño gráfico (Marchese, 2021).

En este artículo se ofrece una panorámica del lugar que ocupa actualmente la VD –entendida tanto como disciplina como herramienta para la creación de imágenes a partir de datos– dentro del amplio espectro que delimita la relación arte-ciencia. Se aborda el desarrollo histórico de la VD a través de una selección de ejemplos de cómo se utilizan las visualizaciones de datos en el arte y las ciencias, identificando influencias mutuas y se reflexiona sobre los principales retos a los que se enfrenta como disciplina y comunidad de práctica. Esta es una tarea ambiciosa que comenzará con una caracterización de la visualización de datos.

2. Qué es la visualización de datos

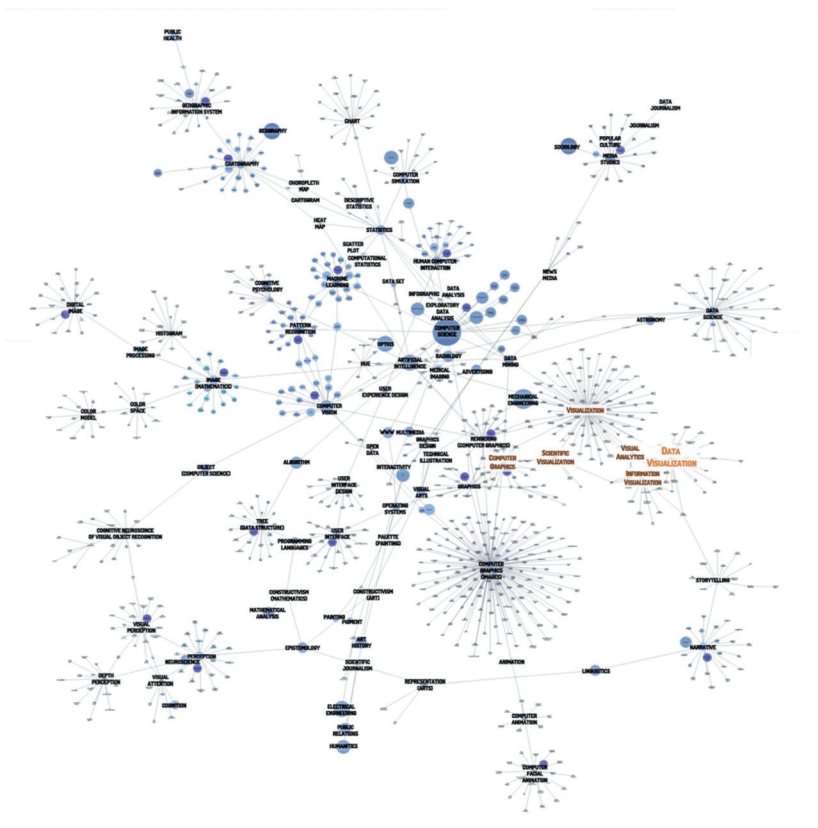
Si se acude a las definiciones en los diccionarios, el término visualización tenía el significado de formar en la mente una imagen visual (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, s. f.). Actualmente, hace referencia a la representación gráfica de datos o conceptos (Ware, 2019).

En lugar de seleccionar una de las diversas definiciones de visualización de datos que se pueden encontrar en la literatura (C. Chen et al., 2007; Friendly y Wainer, 2021; Meyer, 2013; Munzner, 2002; Valero Sancho, 2014; Ward et al., 2010; Wright, 2008), se pone el foco en la creación de imágenes a partir de datos.

Nos encontramos con un primer obstáculo en la variedad de denominaciones procedentes de las distintas tradiciones y disciplinas en las que se ha enmarcado esta transformación de los datos en representaciones visuales. Visualización de datos, visualización de información, visualización científica o, de forma más amplia, visualización, se usan en los ámbitos de la informática y la estadística –o el más reciente como la ciencia de datos–. Desde el ámbito del diseño y las artes visuales encontramos términos como infografía, diseño de información o arquitectura de información. Esta no es una lista exhaustiva de denominaciones, pero sirve para dar una medida de la dificultad para la caracterización de la producción de imágenes a partir de datos que nos permita profundizar en las implicaciones derivadas de la doble vertiente arte-ciencia.

El motor de búsqueda de publicaciones sobre literatura académica *Microsoft Academic*, clasifica –utilizando inteligencia artificial y comprensión semántica del contenido– publicaciones en una jerarquía de temas o campos de estudio.

Figura 1. Red de temas de investigación en torno a «Data visualization» en *Microsoft Academic*



Fuente: Elaboración propia a partir del *topic explorer* de *Microsoft Academic*

La Figura 1 muestra la compleja red de relaciones entre temas de investigación en torno al campo de la visualización de datos (*data visualization*, en naranja). Se han destacado en color marrón los campos más cercanos, que comparten intereses, métodos y técnicas (*visualization*, *information visualization*, *scientific visualization*, *computer graphics*). Se puede ver la fuerte relación que tiene la VD con la informática (*computer science*, el círculo más grande en el centro de la figura) y, en menor medida (siguiendo la diagonal hacia el extremo superior izquierdo), con la estadística (*statistics*) y la cartografía (*cartography*). También muy cercanos se encuentran los campos relacionados con el análisis de datos (*data analysis*, *data mining* y, a la derecha de la figura, *data science*), la interacción persona ordenador (*human computer interaction*), la inteligencia artificial (*artificial intelligence*) y el aprendizaje automático (*machine learning*). En la parte izquierda de la figura queda patente la importancia de las imágenes digitales (*digital image*), el procesamiento de imágenes (*image processing*), los espacios y modelos de color (*color space* y *color model*), que se relacionan con la visión artificial (*computer vision*), el reconocimiento de patrones (*pattern recognition*) y la psicología cognitiva (*cognitive psychology*). Esta última a su vez se relaciona, en la parte inferior izquierda de la figura, con la percepción (*perception*, *visual perception*) y atención (*visual attention*). Finalmente –en mayor relación con el contenido de este artículo–, en la parte central inferior de la figura, se muestran los campos de investigación propios de las artes visuales (*visual arts*, conectado con la computación gráfica, *computer graphics*). Se encuentran aquí los gráficos (*graphics*) y el diseño gráfico (*graphics design*), que están fuertemente ligados a las interfaces de usuario (*user interface*), pero que, siguiendo los enlaces más alejados, se llega, por arriba, a los medios de comunicación (*news media*) y hasta el periodismo de datos (*data journalism*) y, por abajo, a la animación (*animation*, *computer animation*). En el caso de las artes visuales se pueden ver nexos con los pigmentos (*pigment*), la pintura (*painting*), la historia del arte (*art history*), la epistemología (*epistemology*), el arte figurativo (*representation*), la narrativa (*narrative*) y la narración de historias (*storytelling*), este último conectado directamente con la visualización de datos mediante la visualización narrativa (*narrative visualization*).

Se debe mencionar que este gráfico de relaciones entre campos de estudio no es completo, y que en muchos casos los temas representados se corresponden a niveles altos en la jerarquía, de forma que, si se representaran todos los campos hijos y sus interrelaciones, se terminaría con un entramado en la red mucho más detallado, pero también mucho menos comprensible. Así, se ha optado por ofrecer esta perspectiva incompleta que permite, no obstante, ofrecer una vista de pájaro sobre la VD.

Independientemente de la nomenclatura, se identifica un objetivo común: la transformación de información/datos en representaciones visuales orientadas a ser percibidas por un espectador. Los tipos de representaciones y los procesos utilizados para llegar a ellas a partir de los datos originales son muy numerosos y variados, máxime cuando se quiere dar cuenta de su uso en disciplinas tanto científicas como artísticas, así como reflexionar sobre la influencia que ejercen unas sobre otras. Un reflejo de la complejidad de esta tarea es el hecho de que no existe una definición clara o generalmente aceptada para la visualización como disciplina (Kosara, 2007) o de cualesquiera de sus subdisciplinas.

Así, es frecuente encontrar en la bibliografía la caracterización de la visualización de datos como contraste entre las distintas variantes de visualización que se han ido sucediendo y superponiendo a lo largo de la historia –por ejemplo, separando la

visualización científica, en la que la disposición espacial en la imagen generada está implícitamente en los datos, de la visualización de información, en la que esta traducción espacial no es inherente a los datos (Munzner, 2002)–. No obstante, cada vez son más los autores que rehúyen tal distinción, considerando que en ambos casos se trata de representaciones visuales de datos (Ward et al., 2010).

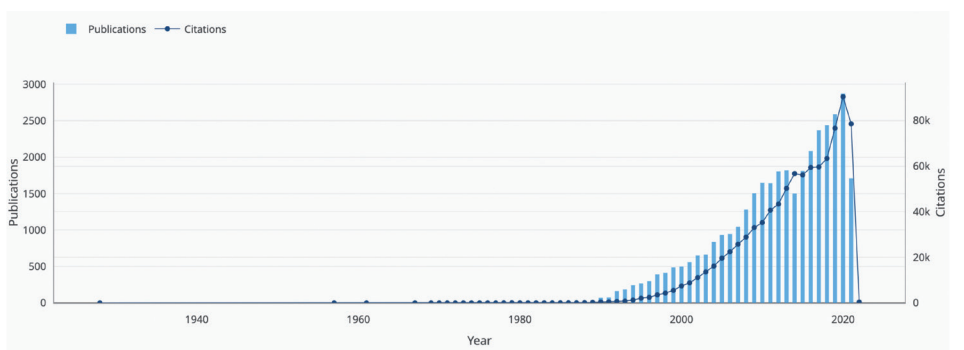
Es importante resaltar dos aspectos en torno a la VD y la computación: por un lado, en la actualidad se entiende que se trata de una traducción de datos digitales a una imagen visual (Wright, 2008); por otro lado, con la incorporación de los ordenadores y todo tipo de dispositivos electrónicos, la VD va más allá de una representación estática, convirtiéndose en una verdadera interfaz entre las personas y los datos, habilitando el diálogo a través de la interacción (Dimara y Perin, 2019).

Un rasgo fundamental del campo de la VD es su carácter interdisciplinar (Kosara, 2007) (Parsons et al., 2011) (Viégas y Wattenberg, 2007) o multidisciplinar (Brodie et al., 2012) (Masud et al., 2010) (Olshannikova et al., 2015) (Kirk, 2012) (Ware, 2019). Informática, estadística, matemáticas, física, biología, cartografía, diseño gráfico, psicología cognitiva, lingüística, comunicación, arte, interacción persona-ordenador son algunas de las disciplinas cuyos conocimientos y métodos intervienen –en diferentes combinaciones dependiendo de la naturaleza de los datos y el objetivo de la visualización– en la creación de visualizaciones de datos. Cabe preguntarse en qué manera cada una de estas disciplinas contribuyen a conformar lo que hoy en día es la VD.

Una aproximación para dar respuesta a esta pregunta puede realizarse a través de la producción científica generada en torno a la VD. Es importante mencionar que este enfoque es limitado en su concepción: ni se realizará una revisión sistemática de la literatura, ni puede capturar las abundantes prácticas y contribuciones a la VD que se producen fuera del ámbito académico o que no quedan registradas en forma de artículos de revistas o actas de congresos. No obstante, esta mirada a la literatura puede ayudar a establecer las coordenadas de la VD en función de la atención dedicada en las distintas disciplinas.

Para el tema «*data visualization*», *Microsoft Academic* tiene indexados 35.933 documentos con una estimación de 919.561 citas. Como se puede observar en la Figura 2, se ha producido un crecimiento sostenido desde el comienzo del siglo XXI, con un incremento significativo del ritmo de producción en la última década, pasando de 1.647 publicaciones y 35.248 citas en 2010, a 2.875 publicaciones y 90.387 citas en 2020.

Figura 2. Publicaciones y citas para el tema «*data visualization*» indexadas en *Microsoft Academic*



Fuente: *Microsoft Academic*

Más allá de constatar el creciente interés en este nuevo campo de estudio, nos interesa identificar en qué áreas de conocimiento se está produciendo. Una forma de empezar a dar respuesta a esta pregunta es comprobar en qué revistas académicas se están publicando los trabajos de VD.

La elección de la fuente de los datos bibliográficos debe tener en cuenta factores como la cobertura, la calidad de los metadatos, las funcionalidades de búsqueda y las opciones de acceso; si se necesitan listas completas de las fuentes de citas, *Microsoft Academic* es la mejor alternativa (Martín-Martín et al., 2021).

En la Figura 3 se puede ver el listado de las 100 revistas académicas con mayor número de artículos publicados para el tema «*data visualization*» entre las publicaciones indexadas en *Microsoft Academic*. Se puede comprobar que todas las revistas pertenecen a diferentes disciplinas del ámbito de las ciencias y prácticamente todas están relacionadas con la informática. En los primeros puestos aparecen revistas de computación gráfica, bioinformática, medicina, geología, estadística, inteligencia artificial, etc. En definitiva, principalmente se relacionan con el propósito de las visualizaciones de datos como herramientas para el análisis y la toma de decisiones. En cuanto a las artes visuales, hay que esperar a los puestos 83 (Information Design Journal) y 84 (Leonardo) para encontrar revistas dedicadas a la aplicación de la ciencia y tecnología en las artes visuales, así como a servir de puente entre investigación y práctica en estas disciplinas.

Figura 3. Ranking de revistas académicas con mayor número de artículos en el campo «*data visualization*» indexadas en *Microsoft Academic*

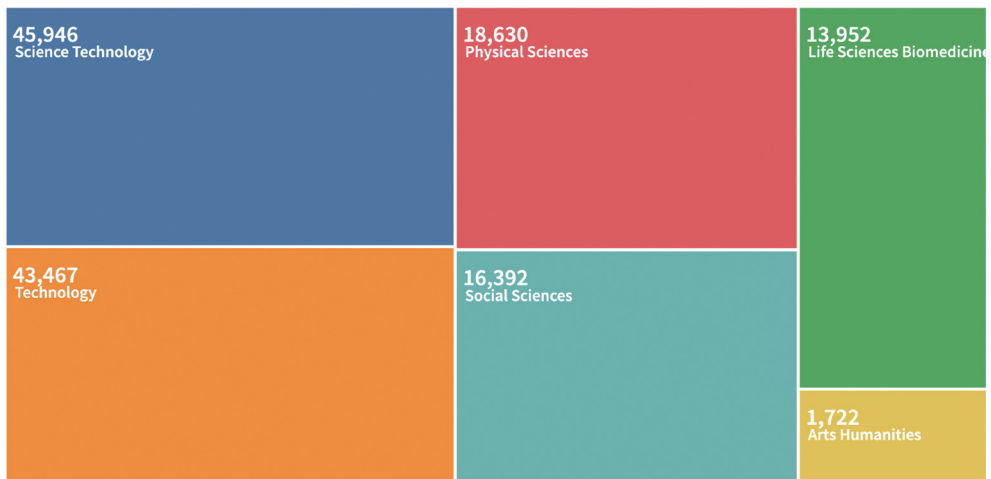
Top Journals in Data visualization		
SALIENCIA PRESTIGE CITATIONS PUBLICATIONS H-INDEX		
Filter Journals		
All Past 10 Years Past 5 Years Past 1 Year		
1. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics	35. Fusion Engineering and Design	69. arXiv: Databases
2. IEEE Computer Graphics and Applications	36. Computer Engineering	70. arXiv: Computers and Society
3. PLOS ONE	37. Methods of Molecular Biology	71. Journal of emerging technologies and innovative research
4. bioRxiv	38. Sensors	72. IEEE Potentials
5. Social Science Research Network	39. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observa...	73. Database
6. Computing in Science and Engineering	40. Procedia Computer Science	74. Journal of Medical Internet Research
7. Lecture Notes in Computer Science	41. PeerJ	75. BMC Medical Informatics and Decision Making
8. arXiv: Human-Computer Interaction	42. Journal of Proteome Research	76. International Journal of Human-computer Studies V Inte...
9. IEEE Computer	43. Environmental Modelling and Software	77. Journal of the American Medical Informatics Association
10. IEEE Access	44. Proteomics	78. IEEE Transactions on Power Systems
11. Proceedings of SPIE	45. arXiv: Graphics	79. arXiv: Computer Vision and Pattern Recognition
12. Bioinformatics	46. ISPRS International Journal of geo-information	80. Visual Informatics
13. PLOS Computational Biology	47. BMC Genomics	81. Information-an International Interdisciplinary Journal an...
14. BMC Bioinformatics	48. Neurocomputing	82. International Journal of Advanced Computer Science an...
15. Nucleic Acids Research	49. Journal of Vision	83. Information Design Journal
16. Information Visualization	50. International Journal of Computer Applications	84. Leonardo
17. electronic imaging	51. Journal of Visual Languages and Computing	85. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters
18. Research Papers in Economics	52. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, R...	86. Nature
19. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering	53. Computational Statistics	87. PLOS Biology
20. Studies in health technology and informatics	54. Journal of Biomedical Informatics	88. Journal of Statistical Software
21. Medical Physics	55. IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bi...	89. Frontiers in Neuroinformatics
22. Computers & Graphics	56. Journal of Computing Sciences in Colleges	90. Information Sciences
23. IEEE Transactions on Multimedia	57. IEEE Spectrum	91. Japan Geoscience Union
24. arXiv: Learning	58. Multimedia Tools and Applications	92. The Journal of Open Source Software
25. Computers & Geosciences	59. Data Mining and Knowledge Discovery	93. Sustainability
26. IEEE MultiMedia	60. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intell...	94. IEEE Intelligent Systems
27. IEEE Transactions on Neural Networks	61. Advanced Materials Research	95. IEEE Signal Processing Magazine
28. Computer Graphics Forum	62. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing	96. First Break
29. F1000Research	63. IEEE Transactions on Learning Technologies	97. IEEE Transactions on Plasma Science
30. Journal of Computational and Graphical Statistics	64. Computational Statistics & Data Analysis	98. Automation in Construction
31. Journal of Visualization	65. IEEE Transactions on Big Data	99. Earth Science Informatics
32. Applied Mechanics and Materials	66. Computer Simulation	100. Computers in Physics
33. arXiv: Instrumentation and Methods for Astrophysics	67. medRxiv	
34. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	68. IEEE Transactions on Magnetics	

Fuente: *Microsoft Academic*

No se incluye un análisis similar para el caso de artículos publicados en conferencias, pero el panorama es muy similar, con las principales conferencias de las áreas de investigación mencionadas en el análisis de revistas. Como muestra, se indican las 10 primeras conferencias: CVPR (*Computer Vision and Pattern Recognition*), IEEE VIS (*IEEE Visualization*), INFOVIS (*IEEE Symposium on Information Visualization*), VAST (*Visual Analytics Science and Technology*), ICCV (*International Conference on Computer Vision*), PacificVis (*IEEE Pacific Visualization Symposium*), CSE (*Computational Science and Engineering*), CHI (*Human Factors in Computing Systems*), SMC (*Systems, Man and Cybernetics*) y HICSS (*Hawaii International Conference on System Sciences*).

Se puede completar esta vista panorámica en torno a la visualización de datos con una consulta similar en la *Web of Science* –mediante la consulta TS= («data vis*») se obtienen todas las publicaciones en el *topic* «data visualization» o «data visualisation», para cubrir tanto la ortografía americana como la británica–. En la Figura 4 y la Figura 5 se pueden ver sendos *treemaps* que muestran respectivamente los principales dominios de investigación y las principales áreas de investigación, correspondientes a los 47.076 documentos indexados para el tema «data visualization».

Figura 4. Distribución por dominios de investigación de documentos de «data visualization» indexados en la *Web of Science*



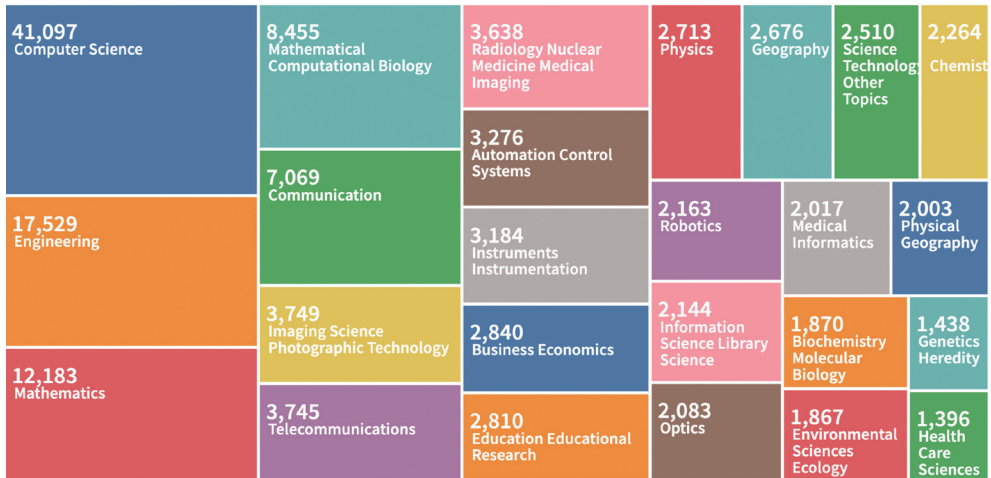
Fuente: *Web of Science*

En la *Web of Science* un mismo documento puede pertenecer a varios dominios de investigación. En la Figura 4 destacan los dominios *Science Technology* (97.60%, 45.946 documentos) y *Technology* (92.34%, 43.467). En un segundo nivel de importancia encontramos *Physical Sciences* (39,57%, 18.630), *Social Sciences* (34,82%, 16.392) y *Life Sciences Biomedicine* (29,64%, 13.952). Es llamativo que *Arts Humanities* solo representa el 3,66% con 1.722 documentos.

Teniendo en cuenta que un mismo documento normalmente aparece indexado en varias áreas de investigación, el análisis de las principales áreas en las que la visualización de datos es objeto de investigación ofrece un acercamiento más detallado. La Figura 5 muestra las 25 áreas de investigación (de un total de 155), aunque en lo sucesivo se discuten también datos numéricos de otras áreas minoritarias que no aparecen

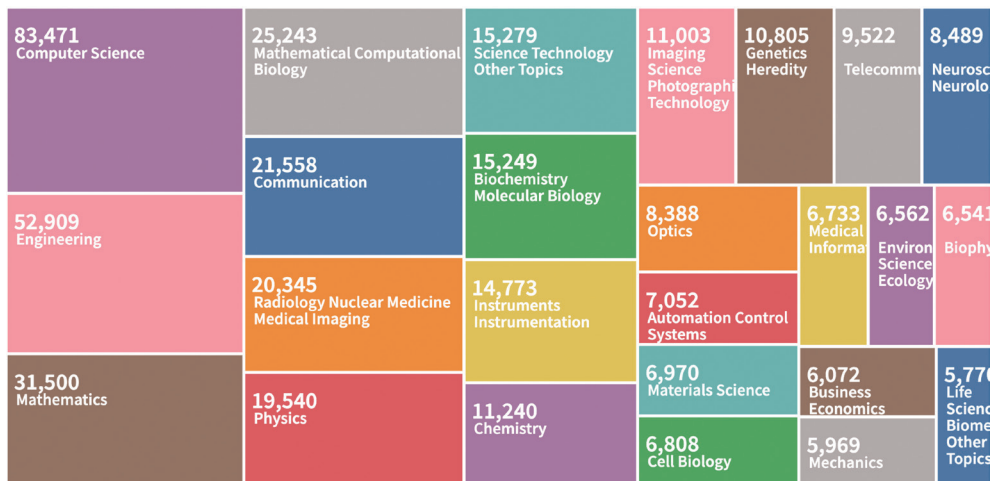
en el *treemap*, pero que son precisamente de gran interés para la argumentación de este artículo. Así, el 87,30% (41.097) de los documentos pertenecen a *Computer Science*; el 37,24% (17.529) a *Engineering*; En menor medida aparecen representadas *Mathematics* (22,63%, 12.183) y *Mathematical Computational Biology* (17,96%, 8.455). Llama la atención que *Communication*, aunque aparece en 5 lugar, solo supone un 15,02% (7.069) de los documentos. *Art Humanities*, en el puesto 29, solo supone un 2,6%, con 1.225 documentos indexados. *Art*, en el puesto 76, tan solo alcanza el 0,47% (220 documentos).

Figura 5. Distribución de documentos por área de investigación para el tema «*data visualization*» indexados en la *Web of Science*



Fuente: *Web of Science*

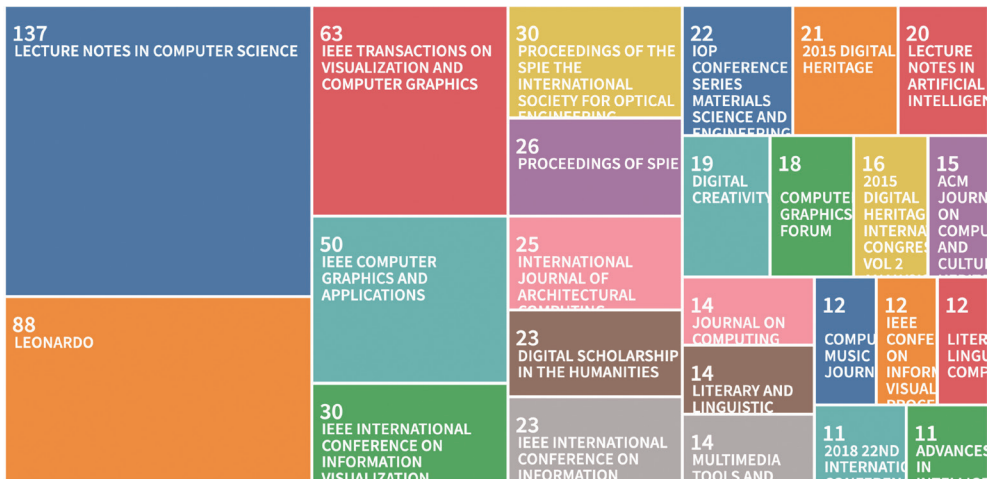
Figura 6. Distribución por áreas de investigación de documentos de «*data visualization*» indexados en la *Web of Science*



Fuente: *Web of Science*

Finalmente, en el dominio *Arts Humanities*, se constata un fuerte aumento del interés en la visualización de datos, con casi la mitad de los documentos (788, 45,77% de los 1.722 documentos indexados en la *Web of Science* para este dominio) publicados en los últimos cinco años. La Figura 7 muestra un *treemap* con las 25 principales fuentes, en el que se observa la enorme fragmentación en cuanto a las fuentes de publicación. Por un lado, la fuente con mayor número de documentos (*Lecture Notes in Computer Science*) aglutina artículos correspondientes a una gran variedad de congresos y supone, con 137 documentos, solo un 7,96% del total de artículos en el dominio. *Leonardo*, quizá el ejemplo paradigmático de revista especializada en la relación arte-ciencia que estamos indagando, solo alcanza un 5,11% del total, con 88 documentos. Lo más llamativo es el hecho de que esos 1.722 documentos se han publicado en 1.516 fuentes diferentes, con 1.356 fuentes que solo cuentan con un documento publicado. Sólo 15 fuentes han publicado más de un 1% (17 artículos o más). Entre estas últimas, se pueden resaltar las revistas *International Journal of Architectural Computing*, *Digital Scholarship in the Humanities* y *Digital Creativity*, que, al contrario que la mayoría de los ejemplos discutidos hasta ahora, se enmarcan en el ámbito de las artes.

Figura 7. Principales fuentes de los documentos en el dominio *Arts Humanities* en torno al tema «*data visualization*»



Fuente: *Web of Science*

¿Ofrece este análisis bibliométrico un reflejo realista del impacto de la visualización de datos en las artes visuales y viceversa? La respuesta es obviamente negativa.

En primer lugar, la mayoría de las bases de datos bibliométricos tienen una cobertura baja en el área de *Humanities, Literature and Arts* (25% *Web of Science*, 39% *Microsoft Academic*) en comparación con la de *Engineering and Computer Science* (48-63%) (Martín-Martín et al., 2021).

En segundo lugar, como ya se ha comentado, muchas de las contribuciones y enfoques novedosos en la visualización de datos ocurre en ámbitos alejados del académico, en diversas comunidades de práctica (Wenger et al., 2002) que se pueden enmarcar en las artes visuales. Un ejemplo de estas comunidades ha dado lugar al conocido

periodismo de datos (Bounegru et al., 2012), que ha crecido hasta el punto de que actualmente todos los medios de comunicación en la web ofrecen a diario noticias acompañadas de visualizaciones de datos interactivas. Los diseñadores participan cada vez más en la creación de visualizaciones de datos «populares» (Quispel et al., 2018). También cada vez es más frecuente encontrar visualizaciones de datos en los museos de arte, como es el caso del Museum of Modern Art en Nueva York (MoMA), con ejemplos como *Mapping the Internet* de Barret Lyon, *Distellamap (Pac-Man)* de Ben Fry o *Wind Map* de Fernanda Viégas y Martin Wattenberg. Son numerosos los eventos en torno a la intersección entre tecnología y arte, como EYEO Festival, VISUALIZED o los Malofiej Awards, en los que la visualización de datos ocupa un importante papel. Por último, otra muestra del empuje de estas comunidades de práctica en torno a la VD se traduce en el creciente número de libros (Kirk, 2012)(McCandless, 2012)(Yau, 2013)(McCandless, 2014)(Knafllic, 2015)(Cairo, 2016)(Schwabish, 2021)(Bremer y Wu, 2021)(Levin y Brain, 2021) para lectores no expertos que ofrecen manuales para la creación/interpretación de visualizaciones de datos y recopilan ejemplos destacados, todo ello orientado a las distintas comunidades.

Este caldo de cultivo alcanza al final de la segunda década del siglo XXI un punto de madurez para aglutinar en una gran comunidad de práctica en torno al conjunto de tecnologías que dan forma a la respuesta ante la pregunta *¿qué es la visualización de datos?* (Cairo, 2020). En el año 2019 se funda la *Data Visualization Society* (DVS) con el objetivo de «servir como un hogar profesional para aquellos que trabajan a lo largo y ancho de la disciplina a la vez que guiar a otras personas en este campo dinámico y en crecimiento, y para aumentar la visibilidad y el valor de visualización de datos para el público en general» (Data Visualization Society, 2020). Esta nueva comunidad se fundamenta en una «visión holística para la visualización de datos que otorga la misma validez a los enfoques que vemos en inteligencia empresarial, arte, periodismo de datos, comunicación científica, análisis y muchas otras razones para la visualización de datos». En marzo de 2020, un año después de su nacimiento, la DVS contaba con más de 11.600 miembros de todo el mundo y desarrolla una intensa actividad a través de diversos canales en redes sociales, la publicación de *Nightingale* –la revista de la sociedad que publica artículos de divulgación y buenas prácticas– y la organización de eventos como la conferencia Outlier.

La DVS realiza anualmente una encuesta (*State of the Industry Survey*) entre sus miembros. A la última encuesta realizada, correspondiente al año 2020, respondieron más de 1.700 personas. La formación previa de los participantes en ciencias, matemáticas o tecnología (39%) es mayoritaria, pero un 15% proceden de las artes y humanidades y un 13% de las ciencias sociales. Por último, un dato relevante que arroja la encuesta es que una abrumadora mayoría (69%) de los participantes declara haber aprendido a realizar visualizaciones de datos de forma autodidacta, solo un 6% mediante una educación formal específica en VD y un 21% que declara una formación combinada a partes iguales entre una educación formal y el autoaprendizaje.

Kosara defendía en 2007 (Kosara, 2007) la existencia de dos culturas en el campo de la visualización, una muy técnica, orientada al análisis, y otra constituida por las obras artísticas. Kosara abogaba por la creación de una tercera cultura, asentada en un esfuerzo integrador, con un fuerte intercambio de ideas entre especialistas en los respectivos campos.

Hasta que esta tercera cultura en la visualización de datos que empieza a vislumbrarse en la tercera década del siglo XXI esté plenamente asentada, las vías de intercambio e influencia entre las dos culturas de la VD permanecen como un área poco investigada.

En la siguiente sección se ofrecen algunos ejemplos significativos extraídos de manera un tanto azarosa de un amplio período histórico.

3. Las dos culturas de la visualización de datos en la historia

Las fronteras entre arte y ciencia en la producción de imágenes son difusas (Gómez-Isla, 2013) y a menudo se enmarcan en la tensión entre objetividad y subjetividad (Daston y Galison, 1992). En el caso de la VD, se atribuye un deseo de neutralidad orientado a apoyar el razonamiento analítico a través de la visualización como herramienta objetiva, en contraste con los artistas visuales que, mediante técnicas similares a las de la visualización científica, crean obras artísticas basadas en datos con nuevas y diferentes motivaciones, pero que están fuertemente marcadas por el punto de vista del artista (Viégas y Wattenberg, 2007; Li, 2018).

Nos enfrentamos a diario al reto de interpretar el mundo mediante datos que nos llegan a través de los medios en forma visual. Los gráficos multiplican el poder de comunicación de complejos fenómenos físicos o de conceptos abstractos. Y con ello, la capacidad de persuadir o confundir, de forma intencionada o no, también aumenta. Al igual que un texto que leemos se nos hace difícil de entender si en él se utilizan palabras cuyo significado desconocemos, la posibilidad de que interpretemos mal un gráfico depende de nuestro grado de conocimiento de los códigos con los que se ha generado.

A lo largo de la historia, diferentes técnicas de representación se han ido utilizando para ampliar nuestra capacidad cognitiva, ayudarnos a comprender la realidad y tomar decisiones. Como veremos, los gráficos derivan en nuevo conocimiento a menudo no exento de problemas de interpretación.

Esta complejidad en la recepción es inherente a la VD, en tanto que imagen técnica, en la que intervienen las voluntades, intenciones e intereses de los agentes del proceso comunicativo (Gómez-Isla, 2013). Recientemente, Cavaller analiza la construcción de visualizaciones de datos, alineando los componentes del marco de la comunicación con los de la VD: mensaje/contenido, forma/ representación gráfica, codificador/configuración de codificación, contexto/diseño gráfico y enfoque, canal/medios y decodificador/usuario (Cavaller, 2021).

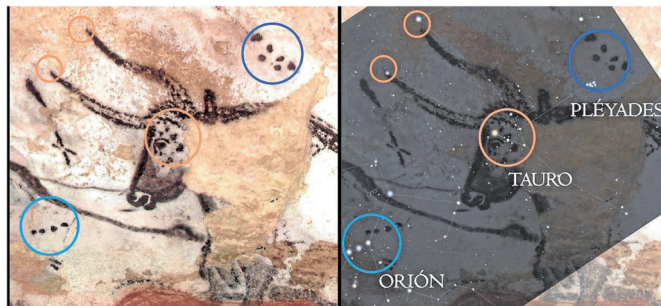
Este enfoque de Cavaller tendría su encaje en el de Ware (Ware, 2019), que, desde una perspectiva cognitiva y perceptual, desglosa el proceso de la VD en cuatro etapas básicas, combinadas en una serie de bucles de retroalimentación: 1) recopilación y almacenamiento de datos, 2) pre-procesamiento para transformar los datos en algo manipulable, 3) traducción de los datos mediante algoritmos informáticos a una representación visual, 4) sistema cognitivo y perceptivo humano (el perceptor). Precisamente Ware, a pesar de este enfoque tan científico, explica en el prefacio de su libro que, tras titularse especializado en la psicología de la visión, decidió convertirse en artista, dedicando tres años a explorar la percepción desde una perspectiva diferente a la académica. Volvió no obstante a la academia, para doctorarse en psicología de

la percepción y, posteriormente, titularse como informático. El libro, en palabras del autor, «trata sobre arte en el sentido de que "la forma debe seguir a la función", y sobre ciencia porque la ciencia de la percepción puede decirnos qué tipos de patrones se perciben más fácilmente».

Hace más de 30 años, Sorensen, en una reflexión sobre la contribución del artista a la visualización científica (Sorensen, 1989), defendía que el pensamiento creativo y el pensamiento científico están muy cerca y que, desde el pintor rupestre hasta ese momento, los artistas han sido también hasta cierto punto científicos o tecnólogos.

En las francesas cuevas de Lascaux, entre los muchos tesoros que se conservan en las paredes desde hace más de 17000 años, se descubrió una cabeza de toro con larguísima cuernos y unos decorativos puntos. Las primeras interpretaciones entendían estas manifestaciones como una suerte de rito mágico en el que el cazador pintaba el animal que quería cazar. Más de 100 años después, en la década de los 70 del siglo XX, Alexander Marshack (Marshack, 1972) sugiere que estas expresiones artísticas del hombre prehistórico eran esencialmente una forma temprana de comprensión científica. Luz Antequera Congregado defiende en su tesis doctoral en 1991 (Antequera Congregado, 2001) que estos puntos parecen imitar la posición del cúmulo de las Pléyades en la constelación de Tauro. Estamos por tanto ante el primer mapa –estelar en este caso– de la historia (ver Figura 8).

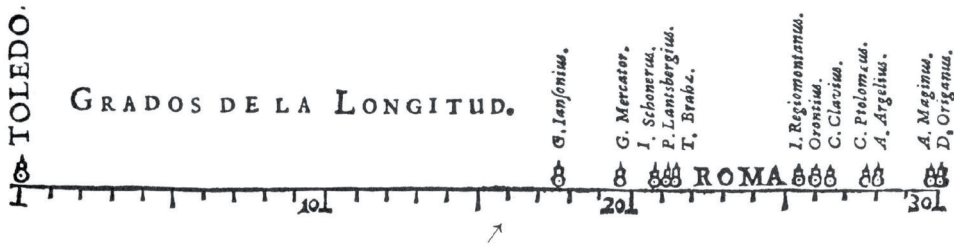
Figura 8. Interpretación como mapa estelar en el arte prehistórico (izquierda) y superposición de un mapa estelar moderno (derecha)



Fuente: Elaboración propia

Saltamos ahora hasta el siglo XVII para encontrar en 1644 al astrónomo flamenco de la corte española, Michael Florent Van Langren, que ostenta el honor de haber creado la primera representación de datos estadísticos (Tufté, 1997; Friendly, 2005): las 12 estimaciones conocidas de la diferencia de longitud entre Toledo y Roma, junto al nombre de los astrónomos (Mercator, Tycho Brahe, Ptolomeo, etc.) que las proporcionaron. El mérito de Van Langren reside en que solo de forma gráfica se puede comprender la amplia variación en las estimaciones –escribió ROMA en el hueco central, comunicando así la incertidumbre y el más probable lugar para el valor correcto–. Una interpretación posterior señala con una flecha la medición correcta (16° 30')(Friendly, 2005), lo que permite entender el sesgo al alza introducido por los 12 astrónomos (ver Figura 9).

Figura 9. Primer gráfico de datos estadísticos, Michael Florent Van Langren (1644)



Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_van_Langren#/media/File:Grados_de_la_Longitud.jpg

Van Langren, además de astrónomo, era cartógrafo, y, llevado por su convencimiento de que la longitud geográfica se podía medir de forma más precisa desde el mar, observando cuándo estaban visibles los distintos accidentes geográficos de la luna, en 1645 publicó el mapa lunar más antiguo que se conserva (Whitaker, 2003) en su libro *Plenilunii lumina Austriaca Philippica* (ver Figura 10).

Posteriormente, Johannes Hevelius en 1647 y Jesuit Giambattista Riccioli en 1651 publicaron nuevos mapas lunares. Estos pioneros de la selenografía, más allá del traslado a dibujos y grabados de lo que podían observar desde un telescopio, se enfrentaron a cuestiones sobre el papel de la representación y qué tipos de conocimiento podrían generarse visualmente (Vertesi, 2007). Precisamente, Galileo Galilei, en 1610 describió la superficie de la luna que pudo observar con el telescopio diseñado por él mismo. Edgerton enmarca este momento como ejemplo paradigmático de la influencia del arte en la ciencia (Edgerton Jr., 1984), en la que el desarrollo de la ciencia moderna experimental es consecuencia de la práctica del arte en el Renacimiento Italiano, con los principios de la perspectiva postulados por Leonardo da Vinci en el origen y la relación de Galileo con el *disegno* florentino como sustrato –los 35 dibujos de las manchas solares realizados por Galileo entre el 2 de junio y el 8 de julio de 1612 fueron elogiados por su contemporáneo Federico Cesi como un «deleite tanto por la maravilla del espectáculo como por la precisión de la expresión», palabras que Tufte elige para ejemplificar lo que el denomina *bellas evidencias* (Tufte, 2006)–. Edgerton también destaca en el contexto de la representación de la luna, el camino inverso de influencia de la ciencia en el arte de la pintura del Barroco: en 1642, el Gran Duque Fernando de Médici propuso a varios pintores florentinos un concurso para averiguar quién podía pintar mejor las maravillosas manchas lunares que el telescopio de Galileo permitía observar.

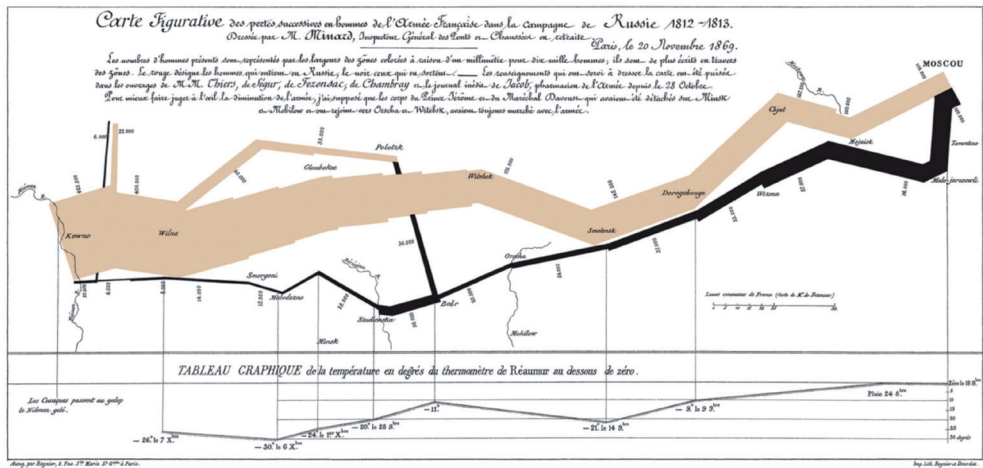
Uno de los ejemplos más populares en la VD también pertenece al campo de la cartografía. Se trata del «mapa figurativo» de Charles Joseph Minard que ilustra la campaña rusa (1812-1813) de la *Grande Armée* de Napoleón (ver Figura 11). Este mapa se recoge en numerosos libros sobre visualización, diseño, cartografía y estadística (Tufte, 1983; C. Chen et al., 2007; Meirelles, 2013; Lauer y Pentak, 2011; Thrower, 2008; Johnson y Bhattacharyya, 2019; Rendgen, 2018), principalmente por su capacidad para evocar la tragedia –en términos de las vidas humanas perdidas en relación con el avance y retirada del ejército y las condiciones climáticas extremas durante la campaña– y la efectividad de una elección simple en el diseño: el grosor de la línea, que se superpone a un esbozo de mapa geográfico, se corresponde con el número de soldados que componían el ejército en cada momento.

Figura 10. Primer mapa lunar, Michael Florent Van Langren (1645)



Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Michael_van_Langren#/media/File:Langrenus_map_of_the_Moon_1645.jpg

Figura 11. Mapa de la campaña rusa de 1812-1813 de Napoleón, Charles Joseph Minard (1869)



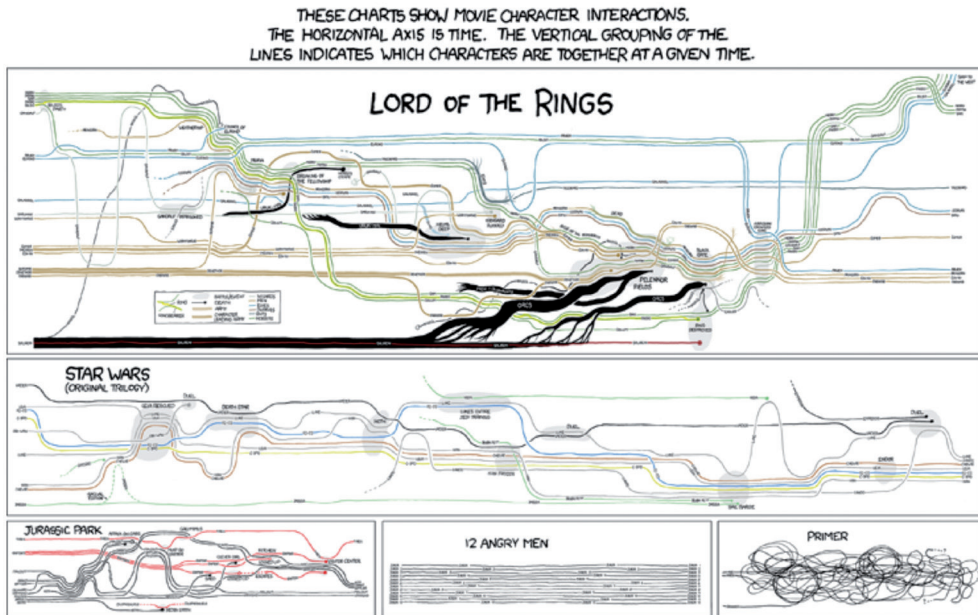
Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Joseph_Minard#/media/File:Minard.png

Nos interesa aquí explorar las influencias y derivaciones en el arte visual que propicia este mapa. Recientemente, Taws ofrece una aproximación desde la historia del arte al mapa de Minard que va más allá de su mérito como visualización de datos (Taws, 2021). En primer lugar, Taws destaca muchas características que este mapa comparte con géneros visuales contemporáneos –destacando el arte militar–, poniendo en relación la representación de las muertes de los soldados con pintores como Alphonse Marie de Neuville, de forma que ambos autores dan respuesta a una misma pregunta –¿cómo representar la historia?–, si bien usan diferentes lenguajes visuales.

En cuanto a técnica de visualización, el mapa de Minard es un mapa de flujo, una variante de mapa temático –la presentación de un patrón geográfico sobre un tema en un mapa– que combina un mapa con un diagrama de flujo para representar el movimiento. El ejemplo más antiguo documentado fue publicado por el ingeniero Henry Drury Harness en 1838 (Robinson, 1955; Robinson, 1967) y es una incógnita si Minard llegó a conocer el trabajo de Harness (Friendly, 2002; Rendgen, 2018). La forma de plasmar visualmente el movimiento de Minard influyó de manera declarada en el científico y cronofotógrafo francés Étienne-Jules Marey y su *método gráfico* (Taws, 2021), en el que reprodujo el mapa de Minard.

Friendly argumentaba en un artículo de 2002 (Friendly, 2002) que el mapa de Minard, a pesar de su influencia en generaciones de estadísticos y geógrafos, era un gran desconocido y por tanto una oportunidad perdida en cuanto a lecciones que enseñar en la visualización de datos. Friendly también ofrecía una revisión de recreaciones del mapa de Minard en sistemas informáticos para el análisis de datos o desde la influyente *Gramática de los gráficos* (Wilkinson, 2005) de Leland Wilkinson, cuya primera edición se publicó en 1999 y que inspiró ggplot2 (Wickham, 2010), el enormemente popular paquete de visualización de datos en el lenguaje de programación R.

Figura 12. Diagramas narrativos de películas en la tira cómica XKCD, Randall Munroe (2009)
Fuente: https://imgs.xkcd.com/comics/movie_narrative_charts.png cc: Randal Munroe



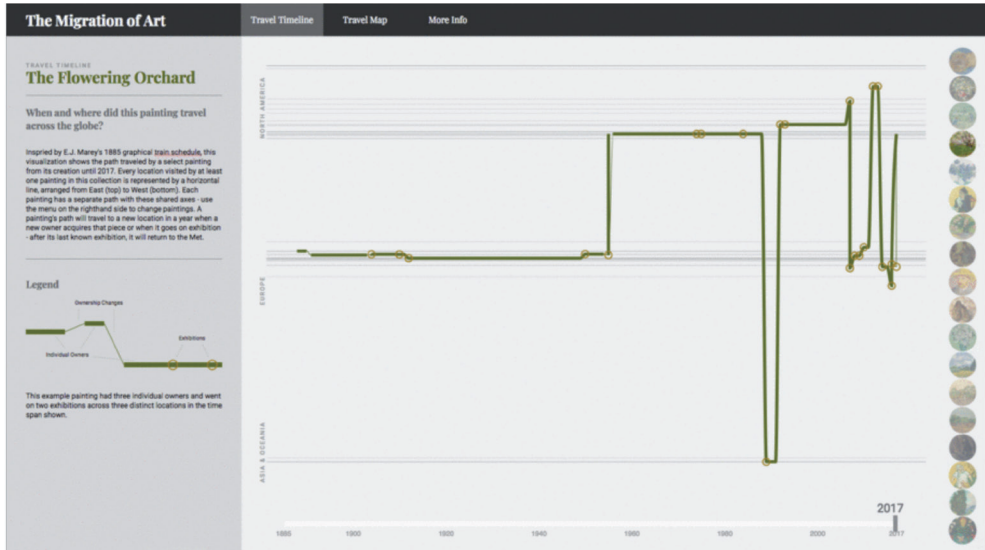
El 2 de noviembre de 2009 se publica en la web la tira cómica de XKCD nº657, que lleva por título *Movie Narrative Charts* (Munroe, 2009). La influencia de Minard es clara, pero la motivación del artista – plasmar en una imagen las interacciones entre los personajes de una película en función del tiempo y el espacio, además del efecto cómico propiciado por la elección de las películas representadas– es diferente. Estos diagramas son una idealización de la estructura de la película sujeta a muchas elecciones de diseño del autor –¿cuáles son los personajes, localizaciones y momentos que el autor decide presentar u omitir?–. Sin embargo, el impacto de esta tira cómica en la cultura popular es enorme y se ha recibido como una representación fidedigna de las obras representadas. Esta cuidadosa eliminación de información también ha sido señalada como uno de los principales atributos del mapa de Minard (Rosenberg, 2005).

Curiosamente, es la tira cómica y no el mapa de Minard el que ha derivado en la aparición de una técnica de visualización de datos denominada *storyline* (Ogawa y Ma, 2010); los autores adaptaron la representación propuesta por Munroe al análisis de las interacciones entre desarrolladores de un proyecto software. Desde entonces se han sucedido diversas propuestas para la automatización de la creación de este tipo de diagramas (T. Chen et al., 2012; Tanahashi y Ma, 2012; van Dijk et al., 2017; Tang et al., 2018; Padia et al., 2018; Tang et al., 2020; Araya et al., 2021).

Recientemente, Ryan Best, en su visualización *The Migration of Art* (Best, 2018), explora en una propuesta similar la visualización interactiva del cambio de ubicación en el planeta de las obras de arte de Van Gogh en la colección del Museo Metropolitano de Arte (MET) en función de los sucesivos cambios de propietario. En su web, Best describe el proceso de diseño seguido para llegar al resultado final y comparte

el código fuente de la herramienta desarrollada. Es llamativo el hecho de que Best declara que su mayor influencia son los diagramas de Marey para los horarios de tren, de 1885, incluidos en su *Método gráfico* –el propio Marey atribuye la invención de estos gráficos a Charles Ibry–. Estos gráficos se utilizaban desde antes de 1845 por la Compañía de ferrocarriles del Norte en Francia (Rendgen, 2019).

Figura 13. *Migration of Art*. Evolución de la ubicación de las obras de arte en la historia Ryan Best (2018)



Fuente: <https://ryanabest.com/work/MigrationOfArt/>

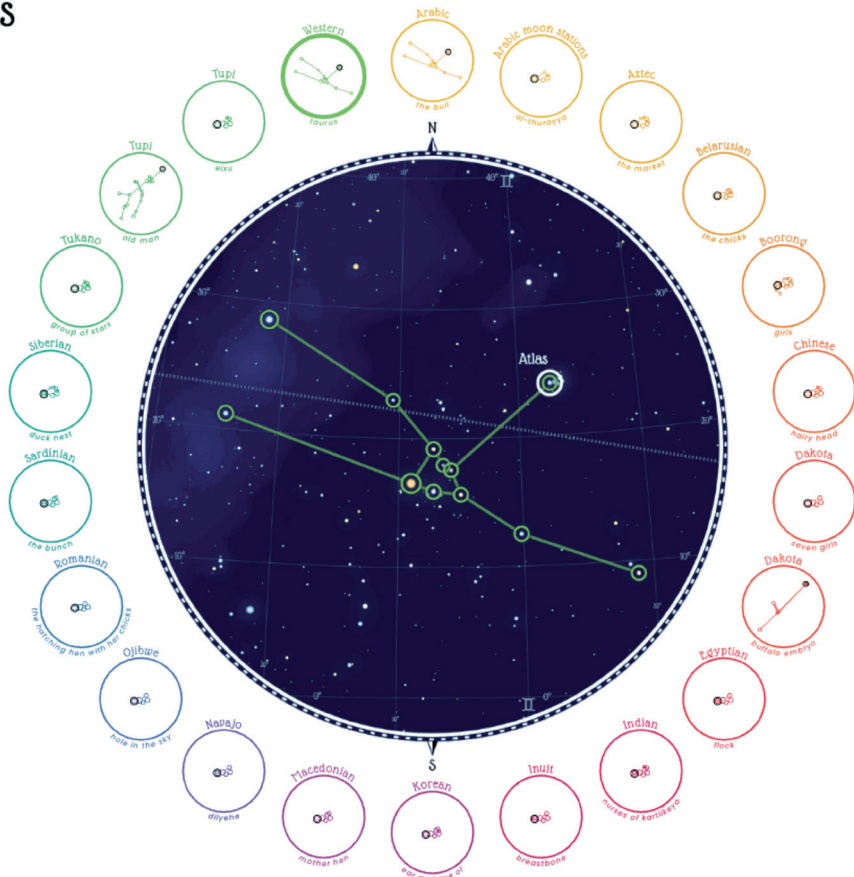
Nadieh Bremer y Shirley Wu se conocieron en la conferencia OpenVis en 2016. Poco después comenzaron un proyecto colaborativo, *Data Sketches*, en el que durante 12 meses cada una de ellas realizaría un proyecto de visualización interactiva cada mes, desde la recopilación de datos y el diseño hasta la codificación de las visualizaciones y la documentación de todo el proceso. Originalmente publicado en la web, recientemente el proyecto se ha publicado en forma de libro (Bremer y Wu, 2021). Bremer es astrónoma de formación y Wu es informática, y ambas se ubican en la creación de visualizaciones y arte a partir de datos. Uno de los proyectos de Bremer en *Data Sketches* es *Figures in the Sky* (Figura 14), y sirve para cerrar esta sección del artículo por relacionarse directamente con el primer ejemplo discutido, el primer mapa estelar (ver Figura 8).

Bremer se preguntaba cómo se relacionaban las diferentes culturas con las estrellas, qué formas y figuras reconocían al mirar el mismo cielo, cuáles eran los mitos y leyendas reflejados en las estrellas. En el proceso de documentación de este proyecto se recogen todas las fases y retos a los que se enfrenta la artista a la hora de crear su obra –visualización de datos–, desde la dificultad de encontrar datos adecuados, los procesos de pre-procesamiento y exploración de un conjunto de datos en abierto disponible, la búsqueda de fuentes de datos alternativas para completar la información necesaria, el proceso de búsqueda del diseño adecuado para la representación,

la complejidad matemática para poder llevar el diseño a cabo, la programación de la visualización y la atención a la interacción del usuario y las anotaciones necesarias para que los usuarios pudieran interpretar la visualización.

Figura 14. Visualización que permite ver similitudes y diferencias en las formas que diferentes cultural identifican en el cielo. *Figures in the sky*, Nadieh Bremer (2017) Fuente: <https://figure-sinthesky.visualcinnamon.com/>

Atlas



Figures in the sky permite al visitante explorar –mediante diversas técnicas de representación– y comparar 28 culturas diferentes a través de las diferentes formas que los humanos han reconocido en el cielo estrellado en distintos puntos del planeta y desde hace miles de años. La Figura 14 muestra un instante en la interacción, en el que el visitante ha seleccionado la constelación de Tauro en la cultura occidental, centrándose en la estrella –Atlas una de las estrellas del cúmulo de las Pléyades–, que en otras culturas forma parte de otras figuras y mitos o leyendas.

4. Conclusiones

La Visualización de Datos, tanto en su vertiente artística como en la científica, aglutina conocimientos de múltiples disciplinas difícilmente abarcables por una persona. Los avances que se han producido son consecuencia de una intrincada red de caminos de ida y vuelta entre arte y ciencia trazados en la historia del hombre.

Aunque en décadas anteriores se ha llamado a una mayor colaboración entre artistas y científicos, estamos más cerca, en el caso de la VD, de un grado de madurez que incorpore de forma holística las contribuciones de ambos. Quedan, sin embargo, numerosos retos que se deben abordar: a) aunque cada vez hay más conjuntos de datos públicos –un ejemplo reciente es el caso de los datos sobre el COVID–, todavía hay muchos ámbitos en los que los datos no están disponibles para el escrutinio de científicos y artistas como es el caso de los datos relativos al cambio climático y el consumo energético global; b) aunque se ha facilitado el uso de herramientas para la creación de visualizaciones de datos, esto también ha provocado la creación de malas visualizaciones por un desconocimiento del funcionamiento subyacente de las herramientas –al igual que los pintores son profundos conocedores de los pigmentos, los artistas deben dominar estas herramientas en tanto que nuevo material artístico– o las implicaciones de determinadas decisiones de diseño –la elección de un esquema adecuado de color es todavía problemática en ciencia (Crameri et al., 2020), por ejemplo–; c) a pesar de la popularidad de la que goza ahora la VD, todavía se debe incidir en la alfabetización visual (García-Sánchez et al., 2019) y la alfabetización de datos (D’Ignazio, 2017; Börner et al., 2019); d) más allá de los estudios cognitivos en torno a algunas técnicas de visualización –la visualización de la incertidumbre es un área muy activa en los últimos años (Theron y Padilla, 2021), por ejemplo–, la recepción de las visualizaciones de datos todavía es un campo poco explorado desde otras perspectivas; y e) si bien la comunidad de práctica en torno a la VD camina hacia una participación ecuaníme de artistas visuales, científicos e ingenieros, el ámbito académico todavía parece funcionar en espacios muy compartimentados con pocas vías de comunicación y reconocimiento.

5. Agradecimientos

Esta publicación es parte del proyecto de I+D+i PCIN-2017-064, financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033/ y cofinanciado por la Unión Europea.

6. Bibliografía

- Antequera Congregado, L. (2001). *Arte y astronomía: Evolución de los dibujos de las constelaciones*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- Araya, V. P., Xue, T., Pietriga, E., Amsaleg, L., y Bezerianos, A. (2021). HyperStorylines: Interactively untangling dynamic hypergraphs. *Information Visualization*. doi:10.1177/14738716211045007
- Azzam, T., Evergreen, S., Germuth, A. A., y Kistler, S. J. (2013). Data visualization and evaluation. *New Directions for Evaluation*, 2013(139), pp. 7-32. doi:10.1002/ev.20065
- Best, R. (2018). *The Migration of Art: Exploring Art's History of Movement*. Recuperado de <https://ryanabest.com/work/MigrationOfArt/>

- Börner, K., Bueckle, A., y Ginda, M. (2019). Data visualization literacy: Definitions, conceptual frameworks, exercises, and assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(6), pp. 1857-1864. doi:10.1073/pnas.1807180116
- Bounegru, L., Chambers, L., y Gray, J. (2012). *The data journalism handbook*. Sebastopol, EE.UU.: O'Reilly.
- Bremer, N., y Wu, S. (2021). *Data Sketches: A journey of imagination, exploration, and beautiful data visualizations*. Natick, MA, EE.UU.: AK Peters/CRC Press.
- Brodlie, K., Osorio, R. A., y Lopes, A. (2012). A review of uncertainty in data visualization. *Expanding the frontiers of visual analytics and visualization*, pp. 81-109. doi:10.1007/978-1-4471-2804-5_6
- Cairo, A. (2016). *The truthful art: Data, charts, and maps for communication*. San Francisco, EE.UU.: New Riders.
- Cairo, A. (2020). Foreword: The dawn of a philosophy of visualization. En *Data visualization in society* (pp. 17-18). Amsterdam, Holanda: Amsterdam University Press.
- Cavaller, V. (2021). Dimensional Taxonomy of Data Visualization: A Proposal From Communication Sciences Tackling Complexity. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 6, pp. 4. doi:10.3389/frma.2021.643533
- Chen, C., Härdle, W. K., y Unwin, A. (2007). *Handbook of data visualization*. Berlín, Alemania: Springer Science and Business Media.
- Chen, T., Lu, A., y Hu, S.-M. (2012). Visual storylines: Semantic visualization of movie sequence. *Computers & Graphics*, 36(4), pp. 241-249. doi:10.1016/j.cag.2012.02.010
- Chittaro, L. (2001). Information visualization and its application to medicine. *Artificial Intelligence in Medicine*, 22(2), pp. 81-88. doi:10.1016/S0933-3657(00)00101-9
- Crameri, F., Shephard, G. E., y Heron, P. J. (2020). The misuse of colour in science communication. *Nature communications*, 11(1), pp. 1-10. doi:10.1038/s41467-020-19160-7
- Daston, L., y Galison, P. (1992). The image of objectivity. *Representations*, 40, pp. 81-128.
- Data Visualization Society. (2020). *Data Visualization Society Strategic Plan 2020. Data Visualization in the Mainstream*. Data Visualization Society. Recuperado de <https://www.datavisualizationsociety.org/mission>
- D'Ignazio, C. (2017). Creative data literacy: Bridging the gap between the data-haves and data-have nots. *Information Design Journal*, 23(1), pp. 6-18. doi:10.1075/idj.23.1.03dig
- Dimara, E., y Perin, C. (2019). What is interaction for data visualization? *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 26(1), pp. 119-129. doi:10.1109/TVCG.2019.2934283
- Edgerton Jr., S. Y. (1984). Galileo, Florentine «disegno» and the «strange spottedness» of the moon. *Art Journal*, 44(3), pp. 225-232.
- Friendly, M. (2002). Visions and re-visions of Charles Joseph Minard. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 27(1), pp. 31-51.
- Friendly, M. (2005). Milestones in the history of data visualization: A case study in statistical historiography. En *Classification—The Ubiquitous Challenge* (pp. 34-52). Berlín, Alemania: Springer.
- Friendly, M. (2008). A Brief History of Data Visualization. En *Handbook of Data Visualization* (pp. 15-56). Berlín, Alemania: Springer. doi: 10.1007/978-3-540-33037-0_2
- Friendly, M., y Wainer, H. (2021). *A History of Data Visualization and Graphic Communication*. Cambridge, MA, EE.UU.: Harvard University Press.
- García-Sánchez, F., Isla, J. G., Therón, R., y Casado-Lumbreras, C. (2019). Assessing Visual Literacy in the Consumers of New Technologies: A Cultural Perspective. *International Journal of Human Capital and Information Technology Professionals (IJHCITP)*, 10(1), pp. 1-21.
- Gómez-Isla, J. (2013). Arte, documento y discurso audiovisual: Entre la imagen de la ciencia y la ciencia de la imagen. En J. Gómez-Isla (Ed.), *Cuestión de imagen. Aproximaciones al universo audiovisual desde la comunicación, el arte y la ciencia* (pp. 79-110). Salamanca, España: Ediciones Universidad de Salamanca.
- Johnson, R. A., y Bhattacharyya, G. K. (2019). *Statistics: Principles and methods*. Hoboken, EE.UU.: John Wiley & Sons.

- Kirk, A. (2012). *Data Visualization: A successful design process*. Birmingham, Reino Unido: Packt publishing LTD.
- Knaflic, C. N. (2015). *Storytelling with data: A data visualization guide for business professionals*. Hoboken, EE.UU.: John Wiley & Sons.
- Kosara, R. (2007). Visualization Criticism—The Missing Link Between Information Visualization and Art. *2007 11th International Conference Information Visualization (IV '07)*, pp. 631-636. doi:10.1109/IV.2007.130
- Lauer, D. A., y Pentak, S. (2011). *Design basics*. Boston, EE.UU.: Cengage Learning.
- Levin, G., y Brain, T. (2021). *Code as Creative Medium: A Handbook for Computational Art and Design*. Cambridge, MA, EE. UU.: MIT Press.
- Li, Q. (2018). Data visualization as creative art practice. *Visual Communication*, 17(3), pp. 299-312. doi:10.1177/1470357218768202
- Marchese, C. (2021). *Information Design for the Common Good: Human-centric Approaches to Contemporary Design*. Bloomsbury Visual Arts.
- Marshack, A. (1972). *The roots of civilization: The cognitive beginnings of man's first art, symbol and notation*. Londres, Reino Unido: Weidenfeld and Nicolson.
- Martín-Martín, A., Thelwall, M., Orduna-Malea, E., y López-Cózar, E. D. (2021). Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus, Dimensions, Web of Science, and OpenCitations' COCI: a multidisciplinary comparison of coverage via citations. *Scientometrics*, 126(1), pp. 871-906. doi:10.1007/s11192-020-03690-4
- Masud, L., Valsecchi, F., Ciuccarelli, P., Ricci, D., y Caviglia, G. (2010). From data to knowledge-visualizations as transformation processes within the data-information-knowledge continuum. *2010 14th international conference information visualisation*, pp. 445-449.
- McCandless, D. (2012). *Information is beautiful*. Londres, Reino Unido: Collins.
- McCandless, D. (2014). *Knowledge is beautiful*. Londres, Reino Unido: William Collins.
- Meirelles, I. (2013). *Design for information: An introduction to the histories, theories, and best practices behind effective information visualizations*. Beverly, MA, EE.UU.: Rockport Publishers.
- Meyer, M. (2013). Designing Visualizations For Biological Data. *Leonardo*, 46(3), pp. 270-271. doi:10.1162/LEON_a_00568
- Munroe, R. (2009). *Xkcd# 657: Movie narrative charts*.
- Munzner, T. (2002). Information visualization. *IEEE Computer graphics and applications*, 22(1), pp. 20-21. doi:10.1109/MCG.2002.974514
- Ogawa, M., y Ma, K.-L. (2010). Software evolution storylines. *Proceedings of the 5th international symposium on Software visualization*, pp. 35-42.
- Olshannikova, E., Ometov, A., Koucheryavy, Y., y Olsson, T. (2015). Visualizing Big Data with augmented and virtual reality: Challenges and research agenda. *Journal of Big Data*, 2(1), pp. 1-27. doi:10.1186/s40537-015-0031-2
- Padia, K., Bandara, K. H., y Healey, C. G. (2018). A system for generating storyline visualizations using hierarchical task network planning. *Computers & Graphics*. doi:10.1016/j.cag.2018.11.004
- Parsons, M. A., Godøy, Ø., LeDrew, E., De Bruin, T. F., Danis, B., Tomlinson, S., y Carlson, D. (2011). A conceptual framework for managing very diverse data for complex, interdisciplinary science. *Journal of Information Science*, 37(6), pp. 555-569. doi:10.1177/0165551511412705
- Quispel, A., Maes, A., y Schilperoord, J. (2018). Aesthetics and clarity in information visualization: The designer's perspective. *Arts*, 7(4), pp. 72. doi:10.3390/arts7040072
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (s. f.). Visualizar. En *Diccionario de la lengua española* (23.a ed.[versión 23.4 en línea]). Recuperado de <https://dle.rae.es>.
- Rendgen, S. (2018). *The minard system: The complete statistical graphics of Charles-Joseph Minard*. San Francisco, CA, EE.UU.: Chronicle Books.
- Rendgen, S. (2019, marzo 15). *Historical Infographics: From Paris with Love*. Recuperado de <https://sandrarendgen.wordpress.com/2019/03/15/data-trails-from-paris-with-love/>

- Robinson, A. H. (1955). The 1837 maps of Henry Drury Harness. *The Geographical Journal*, 121(4), pp. 440-450. doi:10.2307/1791753
- Robinson, A. H. (1967). The thematic maps of Charles Joseph Minard. *Imago Mundi*, 21(1), pp. 95-108. doi:10.1080/03085696708592302
- Rosenberg, D. (2005). Against Infographics. *Art Journal*, 74(4). <http://artjournal.collegeart.org/?p=6993>
- Schwabish, J. (2021). *Better Data Visualizations: A Guide for Scholars, Researchers, and Wonks*. Nueva York, EE.UU.: Columbia University Press.
- Sorensen, V. (1989). The Contribution of the Artist to Scientific Visualization. *School of Film and Video, California Institute of the Arts*. Recuperado de <http://visualmusic.org/text/sciv11.html>
- Tanahashi, Y., y Ma, K.-L. (2012). Design considerations for optimizing storyline visualizations. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, 18(12), pp. 2679-2688. doi:10.1109/TVCG.2012.212
- Tang, T., Li, R., Wu, X., Liu, S., Knittel, J., Koch, S., Yu, L., Ren, P., Ertl, T., y Wu, Y. (2020). Plotthread: Creating expressive storyline visualizations using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(2), pp. 294-303. doi: 10.1109/TVCG.2020.3030467
- Tang, T., Rubab, S., Lai, J., Cui, W., Yu, L., y Wu, Y. (2018). iStoryline: Effective convergence to hand-drawn storylines. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 25(1), pp. 769-778. doi:10.1109/TVCG.2018.2864899
- Taws, R. (2021). Death from Above in Minard's Napoleon Map. *Grey Room*, 83, pp. 82-111. doi:10.1162/grey_a_00321
- Theron, R., y Padilla, L. M. (2021). Editorial: Uncertainty Visualization and Decision Making. *Frontiers in Computer Science*, 3, pp. 85. doi:10.3389/fcomp.2021.758406
- Thrower, N. J. (2008). *Maps and civilization: Cartography in culture and society*. Chicago, IL, EE.UU.: University of Chicago Press.
- Tufte, E. R. (1983). *The visual display of quantitative information (2)*. Cheshire, CT, EE.UU.: Graphics Press.
- Tufte, E. R. (1997). *Visual explanations*. Cheshire, CT, EE.UU.: Graphics Press.
- Tufte, E. R. (2006). *Beautiful evidence (1)*. Cheshire, CT, EE.UU.: Graphics Press.
- Valero Sancho, J. L. (2014). La visualización de datos. *Ámbitos: Revista Internacional de Comunicación*, 25, pp. 1-14.
- van Dijk, T. C., Lipp, F., Markfelder, P., y Wolff, A. (2017). Computing Storyline Visualizations with Few Block Crossings. *Graph Drawing and Network Visualization.*, 10692. doi:10.1007/978-3-319-73915-1_29
- Vertesi, J. (2007). Picturing the moon: Hevelius's and Riccioli's visual debate. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 38(2), pp. 401-421. doi:10.1016/j.shpsa.2007.03.005
- Viégas, F. B., y Wattenberg, M. (2007). Artistic data visualization: Beyond visual analytics. *International Conference on Online Communities and Social Computing*, pp. 182-191.
- Ward, M. O., Grinstein, G., y Keim, D. (2010). *Interactive data visualization: Foundations, techniques, and applications*. Boca Raton, FL, EE.UU.: CRC press.
- Ware, C. (2019). *Information visualization: Perception for design* (Fourth edition). Burlington, MA, EE.UU.: Morgan Kaufmann.
- Wenger, E., McDermott, R. A., y Snyder, W. (2002). *Cultivating communities of practice: A guide to managing knowledge*. Cambridge, MA, EE. UU.: Harvard business press.
- Whitaker, E. A. (2003). *Mapping and naming the moon: A history of lunar cartography and nomenclature*. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press.
- Wickham, H. (2010). A layered grammar of graphics. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 19(1), pp. 3-28.
- Wilkinson, L. (2005). *The grammar of graphics (2.a ed.)*. Nueva York, EE.UU.: Springer-Verlag.
- Wright, R. (2008). Data visualization. *Software Studies: a lexicon*, 209, pp. 78.
- Yau, N. (2013). *Data points: Visualization that means something*. Hoboken, NJ, EE.UU.: John Wiley & Sons.