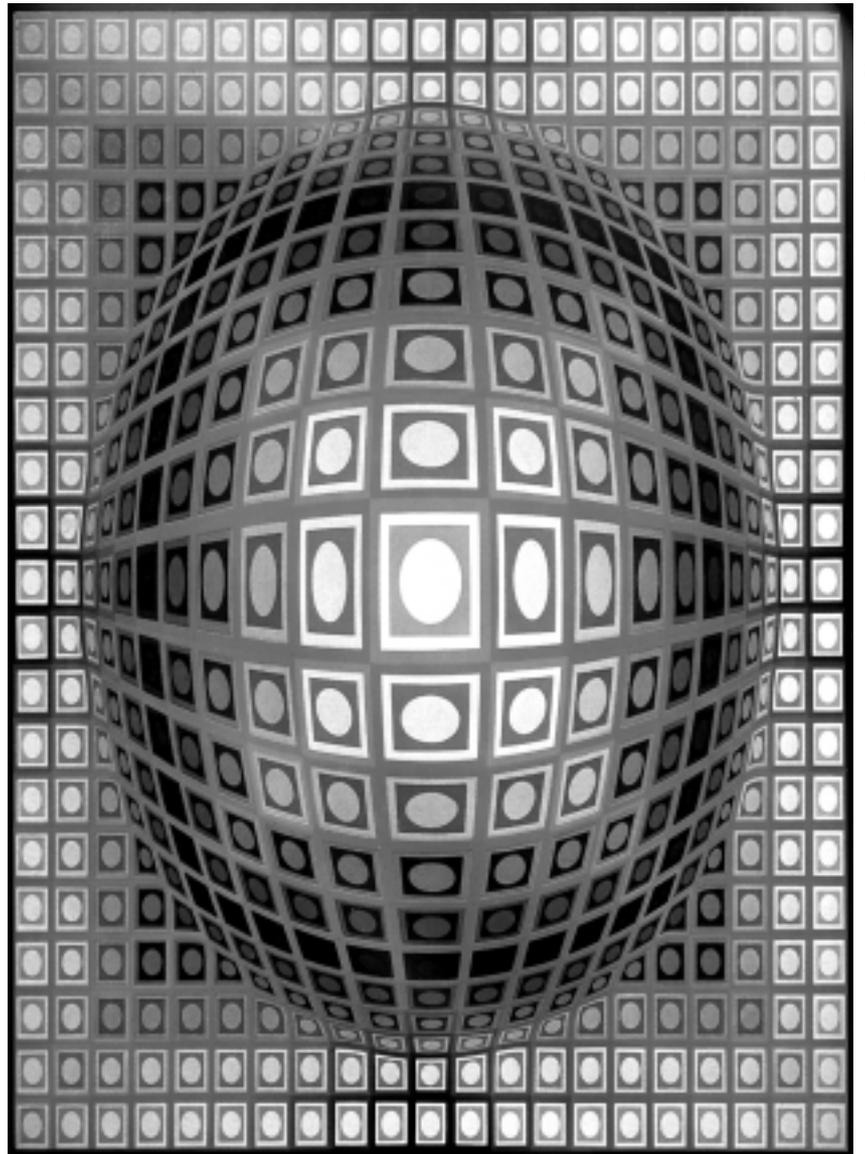


# EL COLOR DEL RUIDO

*Este ensayo va dedicado  
a mis colegas  
Ana Irene Ramírez  
y Luis de la Peña*

No es fácil encontrar algo que suscite tantos sentimientos y fantasías como el arcoiris: ¿quién, niño o adulto, no se ha soñado al pie del arcoiris descubriendo riquezas y tesoros?, ¿quién no se ha imaginado con la facultad de cruzarlo, de tocarlo y sentirlo? La literatura universal se encuentra llena de referencias al arco del cielo: leyendas, mitos, historias y poemas se han inspirado en este fenómeno. Por ejemplo, cuenta una leyenda zapoteca que el murciélago era el más bello de los seres voladores; su plumaje, rico y abigarrado, provocaba la envidia de pájaros y mariposas. El murciélago era soberbio y vanidoso de tal manera, que no perdía ocasión de ofender al resto de los animales, los cuales se organizaron y presentaron una queja ante los dioses. El castigo del murciélago fue perder sus colores y éstos quedaron en el cielo formando el arcoiris. Iris, para los antiguos griegos, era la mensajera de los dioses —el puente entre el cielo y la tierra— y se encargaba de llevar agua desde la laguna Estigia, en el Hades, hasta el Olimpo. El líquido era usado por los dioses para comprometerse, bajo pena de castigos, en votos solemnes. Asgard, el palacio celestial de los pueblos germánicos, sólo podía ser alcanzado mediante Bifrost, el puente encantado. El arcoiris, una vez más, puente entre el cielo y la tierra. Nuestro idioma, el castellano, tiene uno de los nombres más lindos para el arcoiris, pues significa precisamente eso: el arco de Iris. En otros idiomas el nombre que se le asigna al arcoiris no tiene gracia.<sup>1</sup>



Ilustraciones: Vassarely

P e d r o   M i r a m o n t e s

Independientemente del origen de las leyendas, el arcoiris llama la atención por la gama de colores que muestra y por su naturaleza inmaterial y etérea. Desde tiempos inmemoriales, la humanidad se ha preguntado: ¿cómo se forma el arcoiris?, ¿qué son los colores? Aristóteles decía que los colores que percibimos son distintas combinaciones del blanco y el negro. El Estagirita fue un gran pensador y ha sido el pilar innegable de una corriente de pensamiento que sobrevive hasta nuestros días. Sin embargo, habitualmente no se preocupaba de que sus afirmaciones pasaran por la verificación experimental. No obstante, esa teoría se tuvo como cierta en Europa hasta el Renacimiento. Subrayo la palabra *Europa* pues el notable físico árabe Abu Alí al-Hasan ibn al-Haitzam, más conocido como Alhazén, ya sabía en el siglo X que la realidad de los colores no era como Aristóteles la imaginó. Alhazén nació en Basmora, hoy Irak, en el año 965, trabajó y vivió la mayor parte de su vida en Al-Andalus, la España mora. Es una desgracia que el eurocentrismo que domina nuestra educación nos estorbe el acceso al conocimiento de los científicos “no occidentales”, pues los logros de Alhazén son amplios y cubren vastos dominios de la física y la matemática. En su libro *Kitab al-Manazir (El libro de la óptica)*, nos muestra que los colores que percibimos existen por sí mismos y que son una propiedad intrínseca de los objetos, los cuales, al ser alumbrados por una fuente de luz, emiten rayos que viajan hasta los ojos (en Europa se pensaba en esa época que eran los ojos los que emitían la luz que iluminaba a los objetos, teoría divulgada desde la antigüedad clásica por Tolomeo y Euclides). Alhazén también propuso una teoría para explicar la formación del arcoiris, pero ahí falló pues pensaba que el arco se formaba con luz reflejada por las nubes. Sin embargo, el suyo fue un intento de explicación científica, buscando relaciones entre causas y efectos.

Otro árabe, que no se quedaba corto de nombre, Kamal al-Din Abul Hasan

Muhamad ibn al-Hasan al-Farisi (“Kamal Farisi”, para los amigos, muerto en 1320 en Tabriz y cuyo lugar de nacimiento se desconoce), criticó severamente la teoría del arcoiris de Alhazén y propuso otra que hoy consideramos cierta: la de la refracción de la luz del sol en las gotas de lluvia. René Descartes redescubrió esta teoría hacia 1637. Es muy posible que él haya leído a los árabes, en particular a Alhazén, pues en Europa circulaba una traducción al latín del *Kitab al-Manazir* bajo el nombre de *Opticae Thesaurus (El tesoro de la óptica)*. Por otra parte, Alhazén también había sentado las bases de la geometría analítica, por lo que sería una extraordinaria coincidencia que Descartes no hubiera tenido noticia de él, pues los fundamentos de su *Geometría* los publicó como un anexo de su propia *Óptica*.

En 1666, Isaac Newton rompió la blancura de la luz al hacer pasar un rayo de sol por un prisma. ¿Se pueden imaginar ustedes el pasmo y el asombro que debieron haber invadido a Newton cuando ob-

*Si la luz se puede representar en una gráfica espectral, ¿por qué los sonidos no? Pues efectivamente, también las características de los sonidos se pueden apreciar en una densidad espectral.*

servó que la luz blanca, tan homogénea y tan pura, en realidad estaba constituida por una hermosa gama de colores que eran exactamente los mismos que los del arcoiris? Antes los árabes se habían dado cuenta de que existen ciertos fenómenos en los cuales aparecen arcoiris, pero fue Sir Isaac el primero en llevar a cabo un experimento metódico y sistemático. Tan metódico y sistemático que el poeta John Keats creyó que el descubrimiento de Newton había despojado para siempre al arcoiris de su encanto poético y en 1819, un año antes de su prematura muerte a los 25 años de edad, publicó *Lamia*, un poema lírico de romanticismo desgarrador,<sup>2</sup> en el cual lamenta que “la fría filosofía ahuyenta todos los encantos” y que “ha desmadejado al arcoiris”. Sólo aquel que

no conoce ambas puede opinar que hay un abismo insalvable entre la ciencia, a la cual erróneamente se juzga fría y calculadora, y el mundo del arte, rico en sentimientos y emociones.

El rayo que cruza el prisma se descompone en una formación de colores que van del rojo al violeta y pasan por el anaranjado, amarillo, verde, azul y añil. Newton llamó a esa gama de colores, idéntica al arcoiris, el *espectro*. Un nombre curioso si nos atenemos a su significado moderno como sinónimo de fantasma. Sin embargo, *spectrum* en latín quiere decir imagen.<sup>3</sup> También fue Sir Isaac quien inventó un dispositivo, el disco de Newton, para recombinar los colores del espectro y volver a obtener luz blanca.

Se dice que Newton descompuso el espectro únicamente en siete colores, pese a que es continuo, como una analogía de las siete notas de la escala musical en las que se divide una octava. ¿Por qué empleó Newton este símil? Sir Isaac profesaba el hermetismo, una suerte de filoso-

fía con tintes religiosos de origen egipcio-helénico cuyo texto fundamental, el *Corpus Hermeticum*, era una colección de escritos asociados con Hermes Trismegisto (“Hermes, el tres veces grande”, versión griega del dios egipcio Thoth). Los seguidores de estas creencias ejercían la astrología, la magia y el ocultismo. Estoy casi seguro que el origen de este arranque newtoniano de misticismo pitagórico está relacionado con sus ideas herméticas, pero nunca he podido confirmar esta sospecha en la literatura.

Isaac Newton y Gottfried Wilhelm Leibniz dieron a conocer al mundo el cálculo diferencial e integral.<sup>4</sup> Con este descubrimiento llegaron las ecuaciones diferenciales y el mundo no volvió a ser el mismo. Estos artefactos matemáticos re-

sultaron ser el puente entre las causas y sus efectos en un fenómeno dado. En particular, la famosísima segunda ley de Newton se escribe como una ecuación diferencial de segundo orden y establece que si se conocen las fuerzas que actúan sobre un objeto, se podrán predecir sus efectos (siempre que se sepa resolver la ecuación). De aquí se

desprende una visión del universo como un mecanismo de relojería en el cual todos los componentes están sujetos a las leyes de la mecánica y donde es posible deducir los efectos producidos por diversas causas. Desde este punto de vista, resulta normal que Newton pensara que la luz debería estar compuesta por pequeñas partículas, cada una de ellas obedeciendo las leyes de la mecánica y viajando a velocidades enormes. Y así fue: Sir Isaac se apoyó en el hecho evidente de que la luz viaja en línea recta para postular su naturaleza corpuscular. Sin embargo, la naturaleza es pícaro y cuando alguien piensa, así sea Newton,

*En música, el ruido blanco sería el que se alcanzaría si todos los instrumentos tocaran a la vez notas distintas sin ninguna coherencia o coordinación.*

que ha dado una explicación final a un fenómeno, Madre Natura, elusiva y burlona, nos muestra facetas desconocidas y nos regresa a empujones a la modestia.

En 1665, Robert Hooke descubre el fenómeno de la difracción de la luz, en el cual los objetos no arrojan sombras nítidas y que es característico de las ondas.

Por la misma época, en 1669, en los países bajos, Erasmus Bartholin descubre la polarización de la luz, fenómeno también exclusivo de fenómenos asociados a ondas, y Christiaan Huygens explicó, en 1690, los fenómenos de la refracción de la luz postulando su naturaleza ondulatoria y, aunque se negó a aceptar que las ondas luminosas fuesen

transversales (hasta ese momento únicamente se conocían las ondas de sonido, que son longitudinales), su trabajo constituyó un paso decisivo para suponer que la luz es, efectivamente, una onda, a pesar de que Newton, en un fallido intento de explicación del fenómeno de polarización, supuso que los hipotéticos corpúsculos de luz eran asimétricos.

El trabajo posterior de los franceses Fresnel, Fizeau y Foucault y del inglés Young en el siglo XIX, aniquiló lo que quedaba de la teoría corpuscular de la luz y estableció firmemente que la luz era una onda transversal (la dirección de la osci-

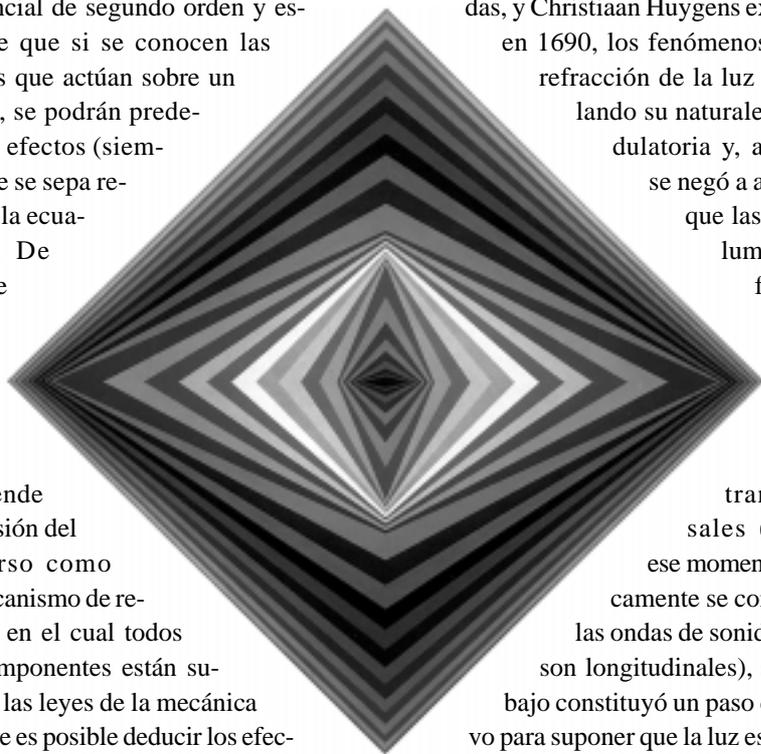
lidad de propagación es mayor en tanto sea más grande la densidad del medio. No obstante, la luz puede viajar en el vacío y esta dificultad generó un buen número de maromas intelectuales; entre las más famosas, la hipotética existencia de una substancia que debería permear y rellenar todo el universo y que fuese transparente, imponderable, inodora e indetectable y que, simultáneamente, tuviese una densidad enorme como para poder sostener la propagación tan rápida de la luz. A esta sustancia se le dio el muy apropiado nombre de *éter*.

Le correspondió al genio de James Clerk Maxwell demostrar que las ondas de luz son oscilaciones electromagnéticas, que son autosostenibles y viajan a velocidad constante en el vacío. Maxwell ejerció una notable influencia en la ciencia de su siglo y la trascendencia de su labor fue sintetizada por Einstein en un discurso pronunciado en el centenario de su nacimiento: “La más profunda y fructífera que la física haya experimentado desde los días de Newton”. Esta labor, resumida en las famosas *ecuaciones de Maxwell* y después confirmada experimentalmente por Hertz, le dio la puntilla a la teoría corpuscular. Newton perdió; la luz es una onda.<sup>5</sup>

## LAS BUENAS VIBRAS

Toda onda u oscilación se caracteriza por tener una frecuencia, que es el número de vaivenes por unidad de tiempo y que se mide en ciclos por segundo, unidades llamadas hertzios en honor a Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), y una amplitud que es el tamaño de las crestas de las ondas. Otra magnitud importante es la llamada *longitud de onda*, que no es otra cosa que la distancia entre cresta y cresta o valle y valle de ondas consecutivas, una variable inversamente proporcional a la frecuencia: longitudes de onda pequeñas corresponden a frecuencias altas y viceversa.

Cada uno de los colores que componen el espectro corresponde a una frecuencia de oscilaciones electromagnéticas o a una longitud de onda. Así, por ejemplo,



el color rojo tiene una longitud de onda de 650 nanómetros (mil millonésimos de metro) y la longitud de onda más corta que podemos percibir es el violeta profundo con una longitud de onda de 380 nanómetros. De todas las frecuencias posibles, sólo un intervalo es accesible a nuestra vista y se conoce como *el visible*. Frecuencias mayores y menores no son detectables a través de los ojos, pero su existencia quedó fuera de toda duda cuando, en 1800, Wilhelm Friedrich Herschel,<sup>6</sup> mediante un ingenioso experimento que consiste en medir con un termómetro sumamente sensible los cambios de temperatura que se producen al desplazar el termómetro a lo largo del espectro, encontró que había luz que no se podía mirar a la izquierda del rojo, pero que el termómetro detectaba. Esta radiación *infrarroja* escapa al sentido de la vista, pero se percibe en la piel como una sensación de calor.

Un año más tarde, en 1801, y seguramente inspirado por los experimentos de Herschel, Johann Wilhem Ritter descubrió que más allá del violeta del arcoiris existe una luz invisible que oscurece un papel impregnado de sales de plata aún más rápido que la porción violeta del arcoiris. Tanto el infrarrojo como el ultravioleta son formas de luz (invisible para nosotros), así como también lo son las oscilaciones que se extienden hacia las altas frecuencias (rayos X, rayos gama, etc.) o bien, que prolongan al infrarrojo hacia las bajas frecuencias (ondas de radio y microondas.)

Una gráfica de la frecuencia (o longitud de onda) en el eje de las abscisas contra la intensidad de cada una de las frecuencias en el eje vertical, se llama *espectro* o *densidad espectral*. Estas representaciones son harto útiles, pues de un vistazo nos permiten saber las características de la fuente luminosa. El espectro de una lámpara roja sería únicamente una línea vertical sobre el punto de la abscisa que le corresponde a la longitud de onda de 650 nanómetros. Evi-

dentemente, la fuente de luz que más influencia tiene sobre nuestras vidas es el astro rey. En la figura 1 se muestra el espectro de la luz que recibimos de nuestra estrella; podemos apreciar que contiene prácticamente todas las longitudes de onda aunque en proporciones diversas, como ya lo decía la magnífica Sor Juana cuando hablaba de Apolo-Tonatiuh:

“Rico el hermoso manto de sus luces, guarnecido de puntas que son rayos, sin que pueda pasar por demasía, tira lo que es rojo a ser dorado.

Con realce de Estrellas, suelto al aire, pudiera azul celeste ir publicando que de su banda tiene los colores.”

“Tira lo que es rojo a ser dorado”. Hermosa descripción del matiz del sol en su tránsito de la aurora al apogeo. ¿Cómo puede algo que es rojo convertirse en dorado? La figura 1 nos permite apreciar que el espectro solar tiene su máximo cerca de la longitud de onda de 600 nm, lo que corresponde al color amarillo, pero al amanecer y en el ocaso, los rayos solares tienen que atravesar una capa más extensa de aire,

porque absorbe todas las longitudes de onda y refleja solamente la que corresponde al color rojo. Un objeto que vemos rojo no es rojo intrínsecamente, únicamente se ve rojo. Si lo iluminamos con luz verde o azul, se ve negro. En un mundo que tuviese un sol cuya luz careciera de la componente verde, las plantas serían negras. Se ha argumentado mucho que la retina de los humanos tiene un máximo de sensibilidad en el color amarillo debido a un ajuste selectivo que ha conducido a que la evolución de nuestros ojos se adapte al máximo de la emisión solar. Es una explicación interesante, pero no explica por qué algunos animales desarrollaron una visión en blanco y negro.

### ¿QUÉ ONDA CON EL RUIDO?

También los sonidos son ondas; es decir vibraciones, pero que en este caso se propagan longitudinalmente; las vibraciones corren a lo largo de la dirección de propagación, zonas de compresión y rarefacción que se alejan de la fuente. El sonido requiere algún medio material como el aire o el agua para viajar. Una oscilación sonora, al igual que la luz, se puede caracterizar mediante una frecuencia o longitud de onda y una amplitud. La diferencia entre un sonido grave y uno agudo se debe a la frecuencia de las ondas sonoras, mientras que la intensidad o volumen del sonido se debe a la amplitud de la onda.

Cada una de las notas musicales corresponde a una frecuencia bien determinada y esto nos permite hablar de un espectro acústico (Newton no estaba tan errado al hacer una analogía entre los siete colores del arcoiris y las siete notas musicales). Así, por ejemplo, 440 oscilaciones por segundo dan la nota La, detalle que es bien conocido por todos los amantes de la música afroantillana

y, en particular, del merengue dominicano.<sup>7</sup> Curiosamente, el La de 440 Hz es la nota que se escucha como tono de invitación a marcar cuando uno descuelga el teléfono. El doble de la frecuencia, 880 Hz,

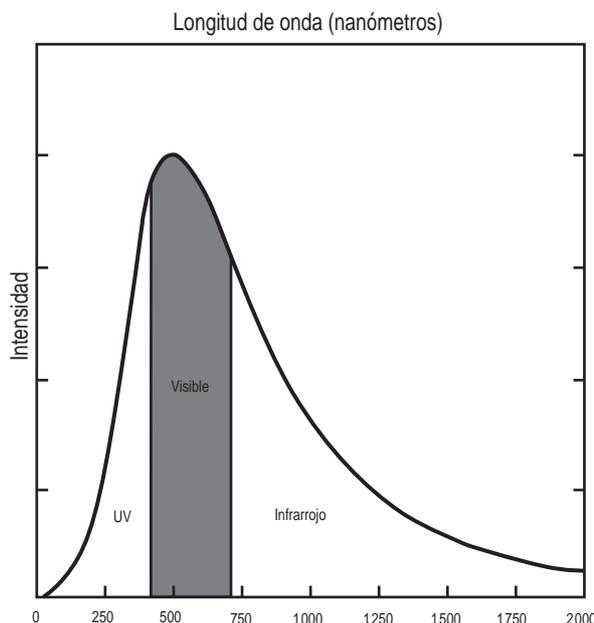


Figura 1. El espectro solar

pues entran de sesgo a la atmósfera y ésta absorbe la mayoría de las longitudes de onda, dejándonos el color rojo, para fortuna de poetas y deleite nuestro cuando se mira desde una playa. Lo que es rojo lo es

también es La pero una octava más alta; en esa octava caben el resto de las notas (La-Si-Do-Re-Mi-Fa-Sol) con frecuencias arregladas en orden ascendente.

Al igual que con la luz, también el rango de frecuencias sonoras accesibles a nuestro oído es relativamente pequeño: no podemos escuchar sonidos con frecuencias menores a 20 Hz (oscilaciones por segundo) y tampoco aquellos con frecuencias por arriba de los 20 000 Hz. De hecho, solamente los oídos jóvenes pueden escuchar este intervalo; conforme envejecemos, nuestro tímpano se endurece y disminuye el rango de frecuencias que podemos percibir. Se nos enseña en la escuela que el ruido es una combinación desordenada e incoherente de sonidos, sin regularidades o periodicidades. En acústica, el ruido es cualquier sonido indeseable o que interfiere con otros sonidos que tienen algún interés o valor intrínseco. En electrónica, el ruido es la presencia de señales impredecibles y aleatorias que contaminan la señal principal. En el medio científico, este término se usa con connotación negativa, como algo que perturba y altera lo que, en su ausencia, sería ordenado o regular. Sin embargo, más adelante veremos que hay de ruidos a ruidos y que algunos de ellos son muy útiles.

Si la luz se puede representar en una gráfica espectral, ¿por qué los sonidos no? Pues efectivamente, también las características de los sonidos se pueden apreciar en una densidad espectral y así como la luz blanca es la combinación de todos los colores del espectro, de todas las frecuencias, se dice que un ruido es *ruido blanco* si están presentes todas las frecuencias de los agentes individuales posibles. En música, el ruido blanco sería el que se alcanzaría si todos los instrumentos tocaran a la vez notas distintas sin ninguna coherencia o coordinación. Igualmente es ruido blanco la estática que se escuchaba en los radios antiguos. Este ruido no tiene ninguna periodicidad ni patrón reconocible, ninguna regularidad; también se le llama “ruido gaussiano” o “ruido de Johnson”.

La posibilidad de descomponer cualquier onda en la suma de oscilaciones periódicas, la debemos a Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), matemático, físico, historiador, ingeniero, egiptólogo, administrador, funcionario, profesor y activista político que estuvo cerca de perder la vida en varias ocasiones durante la revolución francesa. El método que él inventó se llama, con toda justicia, “la transformada de Fourier” y es una de las técnicas más bellas de la matemática. Así como el prisma de cristal es el dispositivo material que nos permite escindir la luz en sus componentes elementales, la transformada de Fourier es el prisma matemático con el que se puede descomponer cualquier sonido y que nos faculta, en lo que quizá sea la parte más interesante de este ensayo, representar en un espectro una *serie de tiempo*.

*El ruido rosa parece ser omnipresente en la naturaleza: aparece lo mismo en las fluctuaciones de la radiación solar que en las Casas de Bolsa, el tráfico citadino y los disparos de neuronas en el sistema nervioso central.*

Estas son secuencias de datos de cualquier variable de interés tomados a intervalos regulares de tiempo, ya sea el índice diario de la Bolsa, la intensidad de las manchas solares, la densidad de población de un cultivo de bacterias, el registro de temperaturas en la Ciudad de México y todo lo que a usted se le pueda ocurrir. Para encontrar el espectro de una serie de tiempo, se toma su gráfica como si fuera una onda (más correctamente, una superposición de oscilaciones) y se somete al análisis de Fourier; esto es, se buscan sus componentes “puras”. ¿Podemos utilizar todos los resultados, la teoría, los métodos y técnicas de la óptica y de la acústica, y hasta sus lenguajes y metáforas, para el estudio de cualquier fenómeno que se pueda dibujar como una gráfica que depende del tiempo! Por ejemplo, si analizamos la gráfica del índice de valores y precios de la Bolsa, su espectro nos dirá cuáles son las frecuencias

de las componentes que predominan y eso nos proporciona información que deja muy atrás a las técnicas estadísticas tradicionales de análisis de series de datos.

DE COLORES SE VISTEN LOS CAMPOS...

La analogía newtoniana entre luz y sonido se extiende entonces a las series de tiempo: hay luz blanca, ruido blanco y series de tiempo blancas, ¡y también las habrá de todos los colores!

La analogía nos llevará a extremos interesantes e incluso divertidos: por ejemplo, si tenemos una fuente de sonido que emita ruido blanco (recordemos que es la mezcla de todas las frecuencias) pero en un medio de propagación que absorba las ondas con frecuencias altas, como es el caso del mar, entonces queda el llamado *ruido rojo*, concepto que se usa a veces en

oceanografía y en el estudio de la dinámica de poblaciones en ecología. ¿Por qué no, entonces, hablar de una jornada roja en la Casa de Bolsa? Se puede, y no quiere decir que hubo violencia, sino que en las fluctuaciones de un día del índice de precios y valores predominaron, en número,

las pequeñas sobre las grandes, y eso se miraría en una gráfica espectral como una curva que desciende de valores grandes en las frecuencias bajas a pequeñas en las frecuencias altas. ¿Y series de tiempo azules? ¿Y de qué color es el registro de temperaturas en la Ciudad de México? ¿Qué color tienen los datos de paperas en el país?

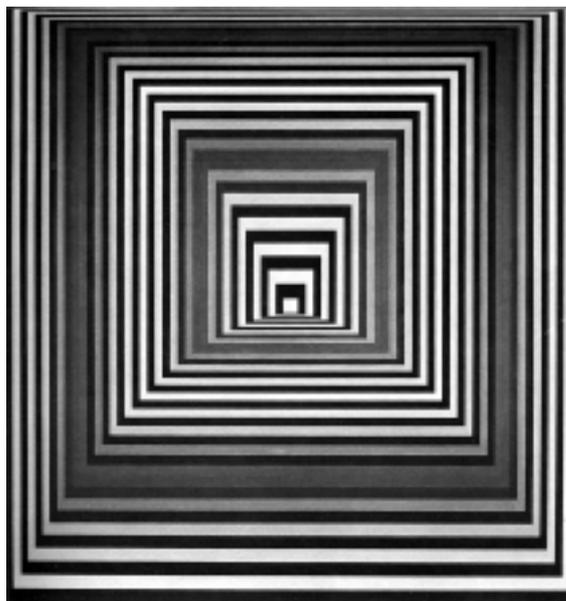
Si ya captamos la idea de interpretar en términos de colores los espectros de sonidos y de las series de datos, entonces podemos hacer un catálogo cromático de fenómenos según su espectro.

Como ya quedamos, un espectro continuo que incluya todas las frecuencias da lugar a ruido blanco; si eliminamos las frecuencias que corresponden a las notas musicales, le estaríamos quitando lo poco de armónico que tiene. El resultado es algo que da una sensación de acidez y por lo tanto, evocando lo cítrico de la naranja, se le llama *ruido anaranjado*. Las sectas

*new age* de ecomísticos y naturistas dicen que el ruido de fondo de la naturaleza es verde. No sé si se refieren al espectro de potencias del sonido o a las evocaciones sensoriales que les produce el color verde a los militantes de estos grupos.

Existe también el ruido azul. Es el simétrico al ruido rojo que vimos arriba. Ruido que se propaga en un medio que absorbe las frecuencias bajas. Los computólogos que se dedican a la computación visual lo usan para el diseño de un tipo de filtraje llamado *dithering*. La finalidad de esta técnica es minimizar los efectos de la percepción falsa del contorno de un objeto debidos a la cuantización de las imágenes en los dispositivos discretos de *display* de las computadoras. Los especialistas en esas artes se han dado cuenta que el ojo humano usa mayormente las altas frecuencias de la luz para discernir los contornos de los objetos y las bajas para representar sus texturas. Cuando

misma energía, entonces la curva de amplitud como función de la frecuencia deberá ser decreciente; a un ruido con estas características se le llama *ruido gris*.



tamaño grande y pocas pequeñas. Schroeder nos dice que este espectro es característico de los desastres tanto naturales como artificiales, tales como inundaciones y apagones.

Por otra parte, también se le llama ruido negro a los sonidos que no podemos escuchar (los ruidos “ultravioleta”), como los de los silbatos para perros.

Los ruidos blanco, café y negro tienen espectros que disminuyen como hipérbolas:

$$1/f^a$$

distinguiéndose por el valor del exponente  $a$ , que es para los tres casos, respectivamente, igual a cero, dos y tres. ¿Qué pasa con el exponente igual a la unidad? Sucede que es un caso notable y especial, al que dedicamos completa la siguiente sección.



lo importante es el diseño de filtros para arreglar los bordes, se da preferencia a las frecuencias altas, es decir, al ruido azul.

Cualquier onda tiene asociada una energía, en el caso de la luz, la energía es proporcional a la frecuencia. Si pensamos en un espectro que contenga todas las frecuencias (ruido blanco, una vez más), entonces las componentes de frecuencia mayor tendrán mayor energía que sus contrapartes de menor frecuencia. Si forzamos cada componente o color a tener la

Ahora pensemos en una serie de números completamente azarosa y a partir de ella construyamos una segunda, en la cual cada número sea el promedio del que ocupaba la misma posición en la serie original con sus vecinos cercanos; entonces tenemos una nueva serie que sigue siendo aleatoria, pero cuyos componentes tienen correlaciones con los anteriores. La transformada de Fourier nos permite calcular su espectro y se observa que éste disminuye como una hipérbola con exponente dos ( $1/f^2$ ). A este ruido se le llama *ruido café*, no porque tenga nada que ver con el color de la bebida, sino porque es equivalente al movimiento browniano, descubierto en 1828 por el botánico inglés Robert Brown.

Hay un par de definiciones para el *ruido negro*. La de Manfred Schroeder que, desde el punto de vista estrictamente técnico, es un poco árida: “Ruido negro es aquel cuyo espectro es una hipérbola con exponente tres ( $1/f^3$ )”.<sup>8</sup> Un espectro que descienda con la rapidez de una hipérbola cúbica refleja un gran dominio de las frecuencias bajas sobre las altas; esto es, muchas fluctuaciones de

#### LA VIDA ES COLOR DE ROSA...

Hemos dejado para el final el *ruido rosa*. El rosado, todo mundo lo sabe, es una mezcla de rojo y blanco; éste es el caso con el ruido rosa: contiene algo de blanco, en el sentido de que todas las frecuencias se hallan representadas, y tantito rojo puesto que las bajas frecuencias entran en mayor proporción que las altas. Su espectro es una hipérbola de la forma  $1/f$  (en coordenadas logarítmicas se tiene una recta de pendiente negativa y cercana a la unidad). Este tipo de ruido parece ser omnipresente en la naturaleza: aparece lo mismo en las fluctuaciones de la radiación solar que en las de la Casa de Bolsa, el tráfico citadino, los disparos de las neuronas en el sistema nervioso central, la variación de la luminosidad de las estrellas y las correlaciones entre palabras de distinta longitud en el idioma inglés. Fue descubierto en 1925, cuando J. B. Johnson estudiaba las fluctuaciones en la corriente de la emisión termoiónica en un tubo al vacío, un bulbo.<sup>9</sup>

W. Schotky intentó una explicación teórica, en 1926, para el caso particular

de la emisión citada. A partir de ese momento, la lista de publicaciones acerca del también llamado “ruido de centelleo” (*flicker noise*) ha crecido de manera explosiva, pero aún hoy no existe una explicación teórica de la razón de su ubicuidad en la naturaleza.

Si no se ha podido elaborar una teoría general es porque el estilo dominante de hacer ciencia no funciona para este caso. El ruido rosa es una manifestación común en una gran cantidad de fenómenos tan disímiles como los que mencionamos arriba a guisa de ejemplo. Esto quiere decir que debe ser independiente de la composición material de éstos y que, más bien, deberá depender de procesos que se dan entre los componentes de los sistemas y no de su naturaleza.

Procesos, no cosas. Este ha sido el pensamiento heraclítico en la ciencia,<sup>10</sup> pero desgraciadamente no es el estilo más popular entre nuestros científicos, pues es más redituable en términos de *papers* adoptar una estrategia reduccionista para desmenuzar un problema en subproblemas más simples. Una de las razones de la impotencia del método reduccionista en el caso del ruido rosa es que los miembros de la familia de funciones  $1/f^a$  son invarian-

tes ante cambios de escala (ver recuadro). Si un proceso se amplifica mediante un factor  $x$ , su espectro se amplifica por el recíproco  $1/x$ . Es decir, los subproblemas resultantes de partir el problema original tienen el mismo nivel de complejidad!

En 1987, el físico danés Per Bak y sus colaboradores propusieron el concepto de *Criticalidad autoorganizada* como un intento de explicación al problema del ruido  $1/f$ .<sup>11</sup> La autoorganización es un fenómeno conocido desde hace muchos años y es la capacidad que tienen algunos sistemas lejos del equilibrio termodinámico de generar estructuras y patrones sin necesidad de la acción de agentes externos; es decir, son sistemas que pueden crear y mantener formas de manera espontánea. Dos ejemplos: primero, el vapor de agua en la atmósfera no se distribuye homogéneamente, sino que se agrega como nubes que tienen formas conspicuas y clasificables. Si la atmósfera estuviera en equilibrio termodinámico (si se apagara el sol), el vapor tendería a una distribución uniforme. Segundo, en la fase temprana del desarrollo embrionario de los animales, en un momento dado se rompe la simetría esférica del agregado celular (la móru-

la) y las células se organizan espacialmente en lo que será la forma final del individuo. Adicionalmente, las células se diferencian, esto es, dejan de ser todas iguales para especializarse según el tejido al que darán lugar.

Por otra parte, la criticalidad es una noción asociada a las transiciones de fase: el tránsito de vapor a líquido, de líquido a sólido, etc. Cuando se tiene una sustancia en equilibrio, lejos del punto de transición de fase, una perturbación externa únicamente tiene efectos locales, mientras que en el punto justo de la tran-

sición de fase, se dice que el sistema se encuentra en un estado crítico, pues las mismas perturbaciones que tienen efectos se sienten en el sistema entero.

La propuesta de Bak y sus colaboradores es que los sistemas dinámicos formados por un número grande de componentes interactuando de manera no lineal (donde los efectos no son proporcionales a las causas), tienen la tendencia espontánea a organizarse a sí mismos en estados críticos de equilibrio dinámico en los cuales ocurren fluctuaciones de todos los tamaños, pero siguiendo leyes de distribución bien precisas. Estas distribuciones se conocen como “leyes de potencias” puesto que la relación funcional entre la magnitud de las fluctuaciones y su abundancia relativa es, ni más ni menos, del tipo  $1/f^a$ ; es decir, una ley de decrecimiento hiperbólico como las que hemos visto.

Existe amplia evidencia de que muchos fenómenos naturales siguen leyes  $1/f$ . Además de los mencionados arriba, uno de los que mejor lo ilustra es la distribución de las magnitudes de los terremotos (la ley de Richter-Gutenberg). Hay muchos terremotos de magnitud pequeña, regular número de magnitud mediana y muy pocos de magnitud catastrófica; esto se refleja en un espectro decreciente y en ese sentido podría ser un espectro rojo, café o negro, pero se ha observado que la potencia de la hipérbola es exactamente uno. ¿Se imaginan ustedes la cantidad de fenómenos en que haya “muchos de los pequeños, regular de los medianos y pocos de los grandes”? ¡Claro que podemos imaginarlos! Las extinciones a lo largo de la historia de la vida en la tierra, la acumulación del dinero en nuestro país (muchos pobres, regular de clamedieros y pocos, poquitos, ricos y muy ricos). Lo sorprendente no es que se dé esta ley de distribución; lo maravilloso es que se dé con una ley matemática muy precisa (la ley  $1/f^a$ ) y con un exponente muy preciso ( $a=1$ ).

Quizá lo más relevante del mundo color de rosa es que se ha demostrado que el espectro  $1/f$  es una indicación de que el fenómeno tiene un origen dinámico y, por lo

#### Música fractal

Se dice que la familia de funciones  $g(f) = \frac{1}{f^a}$  tiene la propiedad de *autosemejanza* pues si multiplicamos por un factor arbitrario, digamos  $b$ , el argumento  $f$  de la función, entonces se dan las siguientes relaciones:

$$g(b \cdot f) = \frac{1}{(b \cdot f)^a} = \frac{1}{b^a} \frac{1}{f^a} = \frac{1}{b^a} g(f)$$

Multiplicar por  $b$  el eje de las abscisas equivale a estirarlo por ese factor. La línea de igualdades previas nos dice que si estiramos ahora el eje vertical por el factor  $\frac{1}{b^a}$ , entonces la gráfica de la función  $g(f)$  se ve exactamente igual a la de  $g(b \cdot f)$ . Esto, por simple que parezca, es extraordinario. Simplemente imagine usted que en el eje horizontal tenemos el tiempo y que el eje de las ordenadas representa una señal sonora, música por ejemplo, entonces si pasamos el disco al doble de la velocidad ( $b = \frac{1}{2}$ ) basta con subir el volumen al doble ( $\frac{1}{b} = \frac{1}{1/2} = 2$ )

¡La música suena igual! Las piezas musicales que tienen esta virtud se llaman “canciones fractales”.

Se invita a los lectores aficionados a la música a proponer composiciones que ilustren el punto ¿se imaginan “el merengue de Mandelbrot” “Corazón fractal partido”, etcétera?

