Arbor

SOBRE LA MODERNA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN (*)

Por P. PUIG ADAM

EL empuje dado durante la última guerra a la técnica de la comunicación ha estimulado su estructuración matemática. Pieza clave de tal estructura es el concepto de *cantidad de información*. La agudeza desplegada en los criterios de medida de dicha cantidad y el paralelismo existente entre las fórmulas que dan esta medida y las que expresan en termodinámica estadística la magnitud física denominada entropía, bien merecen los intentos de divulgación que permitan hacer captar su belleza al público culto no especializado.

Para los físicomatemáticos cultivadores de dicha teoría, comunicación es todo acto por medio del cual un ser influye en la conducta de otro. De este modo incluyen en la teoría de la comunicación la mayor parte de las manifestaciones de la vida de relación humana: lenguaje, arte, música, teatro..., y asimismo las relaciones entre animales, y, a mayor abundamiento, las conexiones entre ingenios y mecanismos.

Un sistema de comunicación enlaza dos sujetos: remitente y des-

(*) Este trabajo recoge, en lo sustancial, las ideas expuestas por el autor en el discurso que pronunció el día 10 de noviembre de 1954 en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. ARBOR lo publica gracias a la gentileza del ilustre académico, quien no sólo ha aceptado el ofrecimiento para publicarlo en sus páginas, sino que ha introducido también en el texto las modificaciones necesarias e insistiendo en los puntos que hacen ver más claramente el interés científico general de la teoría de la información. Por ambas cosas, ARBOR se complace en expresar públicamente su agradecimiento al señor Puig Adam.—*N. de la R.*

ENERO 1955 - N.º 111 - TOMO XXX (págs.: 376-389)
Director de la revista: José María Otero Navascués

tinatario. Conviene considerar el primero como elemento que selecciona el mensaje entre una multitud de mensajes posibles, y el segundo, como un sujeto expectante, cuya incertidumbre apriorística, acerca del mensaje que espera, corre parejas con la libertad de selección del emisor. La transmisión del mensaje se hace a través de un vehículo o canal (material o inmaterial), pero antes precisa transformar el mensaje en señales transmisibles por medio de tal vehículo. Ello obliga a interponer entre el sujeto emisor y el canal un elemento transmisor que traduce el mensaje en señales, y, asimismo, entre el canal y el destinatario un receptor que efectúe la traducción inversa. En resumen: el remitente *selecciona*, el transmisor *traduce*, el canal *transmite* y el receptor *traduce inversamente* para que el destinatario *reciba*.

Nótese que los elementos transmisor y receptor, encargados de traducir el mensaje en señal y viceversa, pueden ser muy complejos, según lo que juzguemos como sujetos remitente y destinatario, lo que consideremos como mensaje y señal, según donde situemos, en definitiva, el origen y el término de la cadena. Porque si en un sistema de comunicación telegráfica consideramos como mensaje el telegrama tal cual sale de las manos del remitente, el sistema transmisor está formado por el aparato Morse o teletipo junto con el telegrafista que le maneja; pero si consideramos el origen del mensaje en el cerebro remitente, entonces se añade al aparato transmisor anterior todo el sistema nervioso muscular de éste, capaz de dar forma escrita al mensaje conceptual. Y aun en capas más profundas hallaríamos todo el sistema lógico intelectual sintético capaz de resumir en pocos términos el complejo conceptual que se desea transmitir. Operaciones inversas aparecen, naturalmente, en la traducción y comprensión del telegrama por parte del destinatario. En cada una de estas fases pueden, pues, surgir causas de error y perturbación (*noise*), afectando no solamente a la transmisión técnica de las señales, sino también a la transformación o traducción previa y posterior del mensaje.

Según la capa más o menos profunda a que lleguemos en el origen y en el destino de la comunicación, así resultan los distintos niveles a que alude Warren Weaver en su interesante epílogo a la teoría de Shanon [1]. El nivel *técnico*, en el que pretende situarse exclusivamente Shanon,

[1] SHANON, CLAUDE: *The Mathematical Theory of Communication.*

estudia simplemente la transmisión de símbolos o señales. El nivel *semántico* cala más hondo, estudiando la transmisión de conceptos. Finalmente, aún cabe situarnos en nivel más profundo que podríamos llamar *psicológico,* estudiando la influencia que determina el mensaje transmitido en la conducta del sujeto receptor.

Afirma Weaver, con razón, que los tres niveles no son tan independientes como pueden parecer a primera vista y no permiten una división demasiado tajante de problemas. Los problemas sobre capacidad y fidelidad en la transmisión de señales no son independientes del contenido conceptual de ellas. Precisamente dicho contenido es el que crea lenguaje, modificando, como veremos, las probabilidades de tales señales, estableciendo relaciones entre ellas e influyendo sustancialmente en los problemas de codificación y de capacidad transmisora, y este mismo contenido conceptual, al crear redundancia en la transmisión, hace subsanables los errores personales y las perturbaciones de carácter técnico que en ella puedan presentarse. Finalmente desde el punto de vista de la psicología experimental, y de acuerdo con el concepto de comunicación antes establecido, la eficiencia de un mensaje se comprobará, en última instancia, observando si se refleja su influencia en la conducta del sujeto receptor.

Las perturbaciones pueden aparecer, como hemos dicho, en cualquiera de estos niveles: la falta de coordinación de ideas, la dificultad de lenguaje, los defectos del aparato transmisor, los ruidos del canal por degradación de la energía aportada en él, las averías del receptor, los fallos del oído del destinatario y, finalmente, sus propias dificultades de comprensión, son otros tantos motivos de perturbación que pueden presentarse en los distintos estadios mencionados.

Ahora bien, ¿qué es lo que, en sustancia, alteran, y en qué medida lo alteran tales perturbaciones? Parece necesario plantear y resolver este problema de medida para juzgar de la bondad de un sistema de comunicación. ¿Cómo valorar, pues, la cantidad de información, de tal modo que la medida obtenida se preste a especulaciones útiles para la técnica del servicio suministrado?

El camino que conduce a tal valoración es bastante más sutil de lo que pudiera parecer a primera vista. Lo inmediato y rudimentario fuera, tal vez, medir la cantidad de información por el número de señales o símbolos transmitidos; pero pronto nos daremos cuenta de las contradicciones en que incurriríamos con un criterio métrico tan tosco.

Para localizar un habitante en Madrid necesitamos más información que para localizarle en una aldea. Una carta llega fácilmente a su destinatario aldeano con el nombre y apellidos, y, a veces, con un apodo basta. En una ciudad necesitamos nombre y apellidos, calle, número, piso, puerta, y todavía habría que añadir habitación si hubiera en el piso muchos huéspedes. Parece, pues, obligado admitir que la cantidad de información necesaria para encontrar a un individuo en un colectivo crece con el número de individuos del mismo; es decir, es una función creciente de dicho número, y sólo resta precisar qué función nos conviene elegir. Es natural adoptar una función tal que dé para dos individuos una cantidad de información que sea la suma de las necesarias para cada uno de ellos. Ahora bien, el número de parejas de individuos que se pueden formar con los de dos colectividades es el producto (no la suma) de los números de individuos de una y de otra. Se comprende así que la escala o función natural de medida es la logorítmica, por ser la única que transforma el producto en suma. Y con esto hemos dado el primer paso fundamental en el problema de la medida: la medida de la información necesaria para individualizar un elemento entre un número finito de ellos se obtiene tomando el logaritmo del número de individuos del conjunto. La base del sistema de logaritmos dependerá de la elección de unidad. Este resultado, obtenido mediante un ejemplo sencillo, se generaliza luego convenientemente para medir la cantidad de información en casos más complejos.

Pero, antes de seguir adelante, permítaseme reforzar la naturalidad de esta medida logarítmica de la cantidad de información con un ejemplo que me parece de la mayor oportunidad.

Entre los juegos de adivinación son bastante conocidas unas tablitas de números (que el lector mismo podrá construir después de leer lo que sigue), tales que, elegido un número al azar, basta señalar las tablas en las que se halla escrito para que el poseedor de la clave acierte el número elegido. Consiste el secreto en sumar los números que encabezan las tablas señaladas.

Para comprender la esencia matemática del juego, basta imaginar los números escritos en sistema binario. Se manejan números que tienen (a lo sumo) tantas cifras binarias (0,1) como tablas examinadas. En la primera tabla escribiremos los números enteros cuya cifra de unidades de primer orden es *1* (es decir, los impares 1, 3, 5...); en la segunda tabla escribiremos todos los que tienen *1* en las unidades de segundo orden, empezando por el más pequeño (es decir, 10, que significa 2, al que seguirán 11 = 3, 110 = 6, 111 = 7...); en la tercera tabla escribiremos todos los que tienen *1* en las unidades de tercer orden, y así sucesivamente. El número que encabeza cada tabla es el menor de ellos, es decir, aquel que, escrito en sistema binario, tiene el *1* en su lugar correspondiente y las demás cifras *0*. De aquí se comprende por qué basta sumar los números cabeza de tablas en que se halla el número elegido para reconstruir éste.

Ahora bien, ¿qué información suministramos al «adivinador»? Ya dije que en las tablas sólo figuran números de tantas cifras binarias como tablas. Señalar cuáles son las que tienen el número elegido, y, por tanto, por exclusión las que no lo tienen, equivale a dar otros tantos informes de carácter disyuntivo, «sí» o «no», que en este caso se traducen en cifras, *1* ó *0* del sistema binario. En la teoría de la comunicación el informe de una discriminación disyuntiva se toma como unidad de información llamada *bit* (Tukey) o *binit* (Goldman). Con un juego de ocho tablas suministramos, pues, ocho *bits* de información, los cuales son necesarios y suficientes para individualizar un número de ocho cifras binarias; es decir, desde *1* hasta 2^8. En general, n bits permiten discriminar un individuo entre 2^n, siendo n, por tanto, el exponente o logaritmo que mide, según se ha dicho, la cantidad de información. La base del sistema de logaritmos es, con esta unidad, el 2. Como se ve, la ley logarítmica nace el convenio sobre la definición de suma, mientras la base del sistema viene dada por la elección de unidad.

Volviendo ahora al ejemplo de las direcciones, nos damos cuenta de que la cantidad de palabras o letras que contienen no dan una medida razonable de la información que suministran, ya que dos cartas de servicio interior, una en Madrid y otra en Guadalajara, por ejemplo, con la misma dirección: «Generalísimo, 1», representan, como hemos dicho antes, cantidades de información muy distintas, debido a que la primera recae sobre un conjunto de individuos mucho mayor que la segunda. En cambio, si la carta procede de un tercer lugar y se añade a la dirección anterior las palabras Madrid o Guadalajara, la cantidad de información resulta ya igualada por referirse ahora una y otra a un mismo conjunto, el de todos los españoles. Las informaciones suplementarias suministradas por los datos geográficos añadidos, Madrid o Guadalajara, tienen también desigual valor informativo, pero con signo de desigualdad opuesto que complementa la información anterior. La palabra Madrid discrimina menos que la palabra Guadalajara, por lo que esta última contiene mayor grado de información.

Resumiendo: dos informaciones literalmente iguales (calle y número) pueden contener cantidades de información totalmente distintas si recaen sobre conjuntos (ciudades) diferentes, cuyo conocimiento se supone implícito en el receptor. Por el contrario, dos informaciones pueden tener idéntico valor, siendo literalmente distintas, por efecto de una distinta codificación geográfica.

El ejemplo que precede, con toda su ingenua simplicidad, pone además de manifiesto las dificultades que introduce en la teoría de la información el carácter semántico de los mensajes. Si unos mismos atributos (calle y número) tienen valor informativo distinto, según el concepto (lugar) sobre el que recaen (Madrid, Guadalajara), no es de extrañar que lo mismo ocurra para atributos más generales contenidos en la emisión de cualquier juicio, ya que constituyen informaciones cuyo valor es variable según la amplitud del concepto sobre el que recae el juicio emitido, y, por tanto, según la cantidad de información que el simple enunciado de dicho concepto supone. Ante esta dificultad, la teoría de la información intenta eludir el carácter semántico de las frases transmitidas, considerando éstas como simples conjuntos de letras del alfabeto, del mismo modo que la información en el juego de las tablas es un conjunto de afirmaciones o negaciones representables por un alfabeto de dos signos, 0 y 1.

Pero la dificultad que se soslaya por un lado surge por otro, complicando las fórmulas y exigiendo un análisis muy fino de las mismas. Si la cantidad de información necesaria para individualizar un número de n cifras binarias se formula razonablemente mediante el logaritmo de 2^n, sería erróneo formular por analogía, mediante el logaritmo de 30^n, la cantidad de información de un telegrama ordinario formado por n signos tomados de un alfabeto que tenga 30 en total. Aunque sea también 30^n el número de variaciones n-arias con repetición de dichos signos, ocurre en este caso que la mayor parte de tales variaciones son totalmente *improbables,* no sólo desde el punto de vista conceptual, por carecer de sentido, sino aun desde el simple punto de vista fonético y ortográfico. Ninguna palabra castellana tiene, por ejemplo, consecutivas las letras q r, ni las j k, ni las v f... Aparece, pues, como esencial en estas cuestiones la noción *probabilidad del mensaje*, noción que estaba ya latente en los ejemplos sencillos antes considerados, sin que haya sido necesario aflorarla hasta ahora.

Si nos situamos en el punto de vista del emisor del mensaje, obsérvese, en efecto, que la cantidad de información es la medida logarítmica de la libertad de selección al azar entre todos los mensajes igualmente probables (direcciones, números de tablas...), y si nos situamos en el punto de vista del receptor, la cantidad de información es el logaritmo de la incertidumbre antes de recibir el mensaje; es decir (con signo opuesto), el logaritmo de la probabilidad del mensaje enviado entre todos los igualmente posibles. (Suponemos, claro es, el mensaje recibido sin perturbación, pues en caso de que tal perturbación exista la cantidad de información se mide por el logaritmo de la razón entre dos probabilidades: las que para el receptor tiene el mensaje enviado después y antes de recibir el mensaje perturbado.)

Fomulemos, pues, ya en términos de probabilidad, la cantidad de información contenida en *n bits*, o si se quiere, el log 2^n, poniéndolo en la forma equivalente — log $1/2^n$, que expresa, en valor absoluto, el logaritmo de la probabilidad $1/2^n$ de acertar un número de *n* cifras binarias elegidas al azar. El signo — se añade por ser negativo el logaritmo de toda probabilidad (siempre menor que 1). Cuando los mensajes no son equiprobables, sino que se distribuyen en un número discreto de probabilidades complementarias p_1, p_2, p_n (de suma unidad), el valor informativo por mensaje será la medida ponderada de las cantidades de información de todos y cada uno de ellos, o sea $\Sigma p_i \log p_i$.

Para formular ahora la cantidad media de información de un mensaje de *n* letras en un idioma determinado, el problema se complica todavía más, pues necesitamos saber no sólo la frecuencia estadística con que aparecen aisladamente las letras del alfabeto en el idioma, sino además la frecuencia de los pares, de las ternas, etc., de ellas, ya que la probabilidad de cada letra en cada momento depende de las que han precedido, según hemos indicado antes, a propósito de ciertas agrupaciones improbables.

Así es como el contenido semántico, que hemos pretendido soslayar, nos impone indirectamente su tributo al constreñir nuestra libertad de selección, obligándonos a formular la cantidad de información a través de procesos estocásticos de naturaleza muy compleja, conocidos en los estudios de estadística matemática con el nombre de cadenas de Markoff.

El conocimiento de la frecuencia estadística de las letras aisladas, así como de sus combinaciones binarias, ternarias, etc., en el idioma permite aprovechar al máximo un canal preestablecido o proyectar el sistema o canal más económico eligiendo una codificación de señales conveniente. Este aspecto ingenieril estadístico del estudio de un idioma no es totalmente nuevo, ya que más o menos racionalmente se hubo de tener en cuenta en los sistemas taquigráficos al uso; pero la moderna técnica de la comunicación es la que ha permitido apreciar su trascendencia, habiéndose tabulado en el idioma inglés las frecuencias no sólo de las letras aisladas, sino también de sus combinaciones binarias y ternarias, y cosa parecida se ha iniciado con las agrupaciones de palabras.

Shanon presenta, en su artículo ya citado, ejemplos de sucesiones de letras construídas al azar teniendo en cuenta dichas probabilidades, y es muy curioso comprobar cómo a medida que se tienen en cuenta más datos estadísticos de esta naturaleza, más se van pareciendo los mensajes aleatorios a los mensajes naturales.

A falta de tablas de probabilidades análogas en castellano, y con objeto de presentar una ilustración más familiar para el lector, construyo a continución una sucesión de mensajes aleatorios, aplicando al castellano una técnica análoga a la indicada por Shanon para el idioma inglés.

Primer mensaje aleatorio.—Obtenido sorteando las 27 letras de nuestro alfabeto y un espacio, y anotando la sucesión de signos sacados a la suerte en los sorteos sucesivos. Ha resultado:

oe iakgzchpraymk jincyfchz icgdolxllbskrollv ...

Una secuencia que no tiene el menor vestigio idiomático, por el hecho de haber atribuído igual probabilidad a las 27 letras (y el espacio), lo que no ocurre en castellano ni en idioma alguno.

Segundo mensaje aleatorio.—Obtenido teniendo en cuenta las frecuencias de las *letras aisladas* en castellano. Para ello hemos abierto un libro (novela) al azar, y hemos anotado la letra o espacio que ocupa un orden designado al azar, en una línea igualmente elegida al azar. (Más adelante justificamos el hecho de que una novela pueda ser tomada como representativa del idioma en cuanto a las frecuencias estadísticas de sus signos se refiere.) Resulta así el siguiente artificial mensaje, en el que ya se atisban rudimentos fonéticos castellanos:

np uiceldi saerqmoiadaa bsi be ometdnesd ...

Una fonética castellana aleatoria que podríamos llamar *aproximada de primer orden.*

Tercer mensaje aleatorio.—Construyamos ahora una aproximación de segundo orden teniendo en cuenta la frecuencia estadística de los *pares de letras.* Para ello procedamos del modo siguiente: Sacada al azar una primera letra (*o*) de una novela castellana, según la técnica del mensaje anterior, abramos el mismo libro u otro, al azar, y leamos en la página obtenida hasta hallar la letra *o*, anotando a continuación la letra (o espacio) que le sigue (*n*). Abriendo nuevamente al azar y leyendo hasta hallar la *n*, anótese la letra (o espacio) siguiente (*a*); y así sucesivamente. Obtenemos así el mensaje:

onado a pon en dies camis maso pan dopo ndumorio mbies ...

Notablemente más aproximado a la fonética castellana que el anterior.

Cuarto mensaje aleatorio.—Aproximación de tercer orden obtenida partiendo de las dos primeras letras anteriores *on* y leyendo en una página abierta al azar hasta hallar la secuencia *on*, a continuación de de la cual anotamos el signo que sigue (*o*). Abierto nuevamente el libro al azar se ha leído hasta encontrar la secuencia *no*, anotando la letra (o espacio) siguiente (*c*), y así sucesivamente. Resultado:

onocen en es trubo hacho cas el quedebe de escuda ma el ...

Quinto mensaje aleatorio.—He aquí, finalmente, una aproximación de cuarto orden obtenida con método parecido. Se han utilizado esta vez dos libros y dos buscadores, operando simultáneamente para abreviar, dada la dificultad de hallar ya secuencias de tres letras previas, para anotar a continuación la cuarta letra. Resultado:

onoraza mudaban acasconsuas ustengos si supero de mismo busca ...

Como curiosidad, indico a continuación las secuencias de cuatro letras del texto que han dado origen aleatorio a la palabra *mudaban*:

Terna previa	Primer fragmento aleatorio donde aparece
za	traza marina
a m	la muriente
mu	pasos mudos
mud	trasmudados
uda	saludables
dab	se le mudaba
aba	compraban
ban	ansiaban la

Como se ve, a medida que se van teniendo en cuenta las frecuencias estadísticas de agrupaciones de orden más elevado, va creciendo la proporción de palabras con sentido propio, y la resonancia fonética de las demás va siendo cada vez más castellana.

Efectuando análogamente construcciones aleatorias con palabras en lugar de letras se logra, a partir de las aproximaciones de segundo orden y tercero, hilvanar al azar frases con sentido sintáctico y gramatical. (Véanse en el citado artículo de Shanon construcciones de este tipo en el idioma inglés.)

En resumen: las interrelaciones entre las probabilidades de los signos constituyen el reflejo estadístico que queda de su contenido conceptual, de tal modo que, recíprocamente, las propiedades estadísticas de las sucesiones de símbolos de un mensaje permiten muchas veces ascender a dicho contenido; es decir, descifrarlo. Tal es el objeto de la criptografía, cuyo fundamento matemático se halla en la estadística y en la teoría de la información. De aquí que criptógrafos e ingenieros de comunicación coincidan en estudiar el lenguaje como conjunto de signos relacionados estadísticamente.

Se comprende que al descifrar un mensaje aislado, atribuyéndole las propiedades estadísticas del lenguaje, se establece una hipótesis sólo admisible como punto de partida de tanteos; pero dicha hipótesis va ganando en verosimilitud a medida que se prolonga el mensaje, de modo que uno de gran extensión, como, por ejemplo, una novela, puede ya considerarse como estadísticamente representativo del lenguaje todo. La consecuencia de ello es que para representar estadísticamente el idioma lo mismo da tomar un mensaje que otro, con tal de que sean suficientemente largos, lo que justifica la técnica que acabamos de emplear en la construcción de mensajes aleatorios.

Ocurre, pues, respecto de las propiedades estadísticas del lenguaje, considerado como conjunto de los infinitos mensajes hablados o escritos imaginables en comparación con las propiedades de uno de ellos suficientemente largo, lo mismo que en termodinámica ocurre respecto de las propiedades de un gas considerado como conjunto de sus moléculas y de las particulares de cada una de ellas. En mecánica estadística se considera cada una de éstas como capaz de adoptar en un tiempo suficientemente largo (al menos con cuanta aproximación se desee) todo el conjunto de posiciones y velocidades de las moléculas del gas, de tal modo que los promedios temporales de dichos valores correspondientes a una molécula cualquiera se consideran representativos de los promedios espaciales de todo el conjunto. Esta tesis, llamada *ergódica*, es la que sirve de base al estudio estadístico de la termodinámica, y sobre su equivalente informativo se asienta asimismo la teoría de la comunicación.

Al amparo de dicha tesis *ergódica* se proyectan los sistemas de comunicación (aparatos telegráficos, emisoras de radio...), cada uno de los cuales está destinado a transmitir a lo largo del tiempo un mensaje indefinido de propiedades estadísticas igualmente representativas del conjunto de mensajes que constituye el objeto y estudio de la transmisión.

Pero la semejanza entre ambas teorías, termodinámica e informativa, se hace más sorprendente cuando se observa que la cantidad de información medida como logaritmo de la probabilidad del mensaje tiene formulación idéntica a la entropía termodinámica, magnitud física proporcional al grado de desorganización del estado de un sistema, grado que se mide por el logaritmo de la probabilidad de dicho estado. Inquietante analogía, tan inquietante que sugiere atrevidas consecuencias.

Como se dijo al empezar, la vida de relación humana cabe en gran parte dentro del concepto de comunicación de que hemos partido. Toda obra literaria o artística, novela, poema, cuadro o pieza musical puede ser considerada como un mensaje, y hemos visto cómo el conjunto de signos tipográficos estampados en una novela tiene propiedades estadísticas representativas del idioma, reguladas por sus propiedades gramaticales, las cuales son trasunto en bloque de su contenido semántico. Si de una novela pasamos a un libro de versos rimados, se reflejarán, además, en las propiedades estadísticas de los signos, las exigencias de la rima. Pues bien, este sencillo ejemplo de cómo las propiedades estadísticas de la forma acusan la presencia de un contenido estético sugiere generalizaciones de mayor alcance. Pienso que algo parecido ocurre con las propiedades estadísticas de la estructura externa en los mensajes de pintores y músicos. Me refiero, claro es, a la distribución espacial de formas y colores en artes plásticas, a la sucesión temporal de ritmos y tonos, armonías y timbres en música, cuyas propiedades deben ser asimismo reflejo de las normas estéticas seguidas en la obra.

Ahora bien, parece al pronto que este género de mensajes escapan a todo intento de medida por el pretendido carácter de continuidad que atribuímos a su *alfabeto*, es decir, a la gama de tonos y timbres o a la gradación de formas y colores empleados en música o en pintura.

Sin embargo, si analizamos la naturaleza de las estructuras orgánicas a través de las cuales nos llegan tales mensajes, no hallaremos sino un número finito de fibras que vibran, un número finito de células excitadas, un número finito de excitaciones diferenciadas por umbrales de sensación, un número ciertamente enorme de todos estos elementos y de sus combinaciones, pero finito.

Por otra parte, la teoría matemática de la comunicación ha elaborado ya el instrumental matemático necesario para dar entrada a dichos mensajes en la teoría cuantitativa de la información. Pero al margen de esta teoría matemática especializada, que no parece adecuado detallar aquí, quizá baste recordar al lector la limitación macro y microscópica de nuestros sentidos para que éste pueda concebir la cuantificación de tales mensajes y la posibilidad de tratarlos matemáticamente, como los mensajes discretos de la telegrafía, sin más dificultad que la derivada de la enorme magnitud de los *alfabetos* en que se expresan.

Ahora bien, al existir la posibilidad teórica de formular la entropía o cantidad de información de un mensaje musical o pictórico de análoga manera a como hemos indicado la formulación de la de un mensaje telegráfico, podemos admitir que esta entropía seguirá midiendo el grado de libertad de que se ha hecho uso en la selección del mensaje; es decir, en la génesis de la obra, como la entropía de un gas mide el grado de desorganización de sus moléculas. Y del mismo modo que el contenido semántico del mensaje telegráfico determina las propiedades estadísticas de las señales, así también el contenido estético del mensaje artístico se refleja en sus estructuras formales, condicionando su aleatoriedad, su libertad y, por tanto, su entropía. A mayor libertad, mayor entropía; a la plena aleatoriedad, entropía máxima.

Es más: las propiedades estadísticas de la forma literaria, musical o plástica en una época o escuela son las que acaso caractericen el «estilo» de dicho momento o lugar. Cuando la forma se convierte en fórmula, es decir, en regla, surge el amaneramiento, que se manifiesta matemáticamente en pobreza de estructuras y gran frecuencia de ellas. En resumen: en pérdida de libertad y, por tanto, de entropía.

Así podemos ver desde un punto de vista matemático la implacable evolución del arte. Es un proceso incesante e inevitable de ruptura de formas, acaso consecuencia del pecado engendrador de reglas y maneras. A lo largo de este proceso se recae, a veces, en estructuras formales, antiguas, pero casi siempre se crean sistemas estructurales nuevos, cada vez más libres, cada vez más relajados. Se puede concebir, pues, la evolución del arte como un proceso de entropía informativa creciente análogo al segundo principio de la termodinámica que señala el crecimiento de la entropía en el mundo físico inanimado, la tendencia inexorable al desorden energético y al caos. Tan inexorablemente característico que Eddington lo considera como el único fenómeno del mundo físico capaz de señalar por sí solo la «flecha del futuro» (*times arrow*), el que nos indica de modo inmediato si los fotogramas de una película están montados en el orden en que se impresionaron o al revés. Pues bien, del mismo modo el tiempo marca su huella inexorable en la evolución de los estilos en el sentido indicado de entropía informativa creciente, sentido que nos permite asimismo reconocer en líneas generales la cronología de las obras artísticas por su simple contemplación o audición.

Centrado este artículo en torno al concepto y medida de la cantidad de información, creemos que debemos poner aquí punto final a esta última y breve escapada al terreno de los mensajes artísticos, escapada que, si bien nos ha desviado del tema central, habrá permitido entrever las amplias perspectivas que se ofrecen a la teoría de la información en campos no específicamente técnicos.