

Apuntes de
Fotografía

Muestreo y Digitali- zación de Señales

Daniel Sosa

Muestreo y Digitalización de Señales

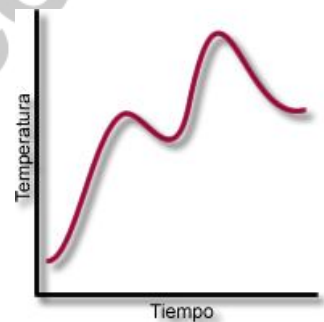
Los sistemas electrónicos digitales utilizados para el procesamiento de señales requieren que las mismas, para su tratamiento, ingresen a ellos convertidas en variables numéricas que puedan interpretar y manejar, esta conversión se realiza en dos etapas: el muestreo y la digitalización.

Estos conceptos son aplicables a todo tipo de señales aunque eventualmente, según en dónde se lo esté aplicando, pueden surgir algunas diferencias. En este texto se desarrollan estos temas de manera general y luego se los enfoca a la fotografía.

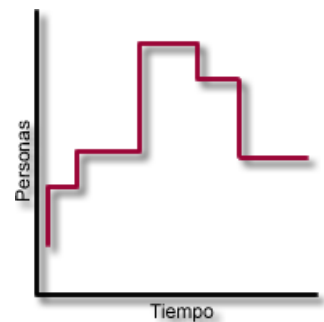
Señal continua y señal discreta

El primer punto a considerar para comprender los procesos que se explican más adelante es comprender a qué llamamos señal continua y, por contraposición, qué es una señal discreta.

Consideremos por ejemplo el cambio de temperatura a lo largo del día, observaremos que por la mañana temprano está baja y va subiendo hasta cierta hora a partir de la cual comienza a descender nuevamente, durante este proceso, el cambio se produce de manera *continua* lo que significa que no hay saltos, es decir, si la temperatura pasa de 20°C a 21°C no lo hará de un salto sino que deberá pasar por todos los valores intermedios ($20,1^{\circ}\text{C}$; $20,2^{\circ}\text{C}$; $20,29^{\circ}\text{C}$; etc.). Si graficamos la variación de temperatura a lo largo del día tendremos una línea continua como la de la figura.



Supongamos ahora que registramos la cantidad de gente presente dentro de un supermercado a lo largo del día, en este caso el cambio de un valor a otro puede darse en un solo paso sin pasar por valores intermedios, esto es porque nuestra variable no puede tomar tales valores intermedios, es decir, en el local podrá haber, en un momento dado, 20 o 21 personas pero nunca 20,5 personas, es más, en un momento dado podrían ingresar simultáneamente 3 personas y el número saltar en esa cantidad, pasando, por ejemplo, de 50 a 53 en el mismo momento. Cuando tenemos una variable que cambia de a saltos (en principio en valores enteros pero esto no es imprescindible) decimos que la misma es DISCRETA, si graficamos este tipo de variable obtendremos algo como lo que se muestra en la figura.



Todas las señales que en la naturaleza se modifican de manera continua, el cambio en la intensidad luminosa a lo largo del día, modificaciones en la presión atmosférica, la humedad o el nivel de audio, se producen de manera que entre un valor y otro siempre hay un intermedio. Aún cambios que podrían parecer súbitos a la primera impresión, como cuando encendemos la luz en una habitación, se producen de manera continua, un salto discreto implicaría que la intensidad luminosa pasara de la oscuridad a plena luz *instantáneamente* y la naturaleza no permite los cambios instantáneos, todo cambio requiere un tiempo (por pequeño que sea) y durante ese tiempo la variable pasa por todos los valores intermedios.

Acondicionamiento de la señal

Iniciamos este texto asumiendo que los sistemas encargados del procesamiento de las señales son electrónicos, lo que implica que trabajan con señales de naturaleza eléctrica, sin embargo en la mayoría de los casos las variables que deberemos procesar no lo son: en un

sistema de audio las señales son variaciones de presión, en uno de video son ondas luminosas, en otros casos será temperatura, posición, etc. En consecuencia, previo al procesamiento será necesario convertir la en una de naturaleza eléctrica, este paso es realizado por algún dispositivo adecuado que en general se denomina sensor o transductor (la denominación exacta suele cambiar con los textos y los autores) cuya función es convertir las variables de distinta naturaleza en señales eléctricas.

En realidad, el *sensor* es solo una parte del proceso de acondicionamiento el cual involucra también elementos de filtrado, eliminación de ruido y amplificación, todos los cuales tienen como función adaptar la señal a los requerimientos del sistema electrónico encargado de procesarla.

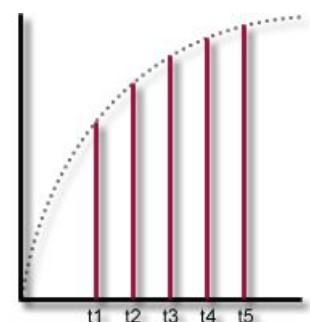
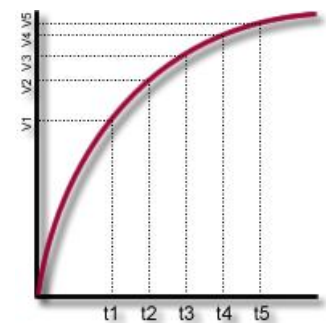
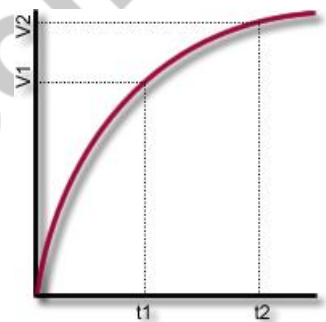
El Muestreo

La figura representa una parte de una señal continua cualquiera que varía con el tiempo, se señalan sobre ella dos instantes de tiempo (t_1 y t_2) y los respectivos valores de la señal correspondientes a estos instantes (v_1 y v_2), entre estos dos valores, y en razón del carácter continuo de la señal, hay infinitos valores de v , si bien todos estos valores describirían completamente a la señal resulta obvio que no es posible evaluar la función para infinitos valores, en consecuencia, para operar con ella será necesario *elegir* ciertos instantes de tiempo y evaluar la función en ellos.

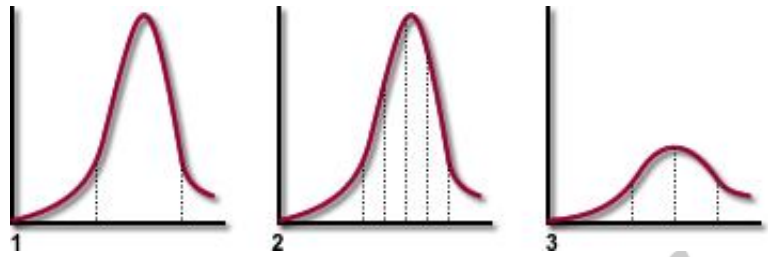
Al proceso de elegir o seleccionar estos valores, *que deberían resultar representativos de la señal que deseamos procesar*, se lo denomina *muestreo*, y a los valores de la señal correspondientes a los instantes de muestreo se los denomina *muestras*, la figura presenta la misma porción de señal y cinco valores de ella tomadas en sucesivos instantes de tiempo (t_i), a cada uno de los cuales corresponde un valor de v_i , a continuación se observan cinco líneas verticales, cuya altura es v_i que constituyen una nueva señal denominada *señal muestreada* (la curva original se ha dejado en la figura como referencia, en la señal muestreada dicha curva desaparece y quedan únicamente las barras verticales). La frecuencia con la que se toman las muestras se llama *frecuencia de muestreo* y, como veremos, es un parámetro de gran importancia en la calidad de la señal muestreada y de los archivos resultantes en las señales digitalizadas.

Obviamente, el proceso es prácticamente aplicable en tanto sea posible recuperar la señal original a partir de la señal muestreada, se demuestra matemáticamente que, en tanto el conjunto de datos sea el adecuado (en realidad, siempre y cuando la frecuencia de muestreo sea la adecuada) es posible esta recuperación con una mínima pérdida de información.

La tres figuras que siguen presentan diferentes posibilidades que permiten hacer comparaciones. En 1 y 2 se ve una misma señal con dos frecuencias de muestreo diferentes, en el primer caso se han tomado solo dos muestras y en el segundo cinco para el mismo período de tiempo, como puede observarse, el primer caso presenta una clara pérdida de información pues se pierde el pico de la señal, en cambio en el segundo caso el pico ha sido muestreado correctamente y la información correspondiente no se ha perdido. La conclusión sería que para evitar pérdida de información deberían tomarse muchas muestras, sin embargo esto no es necesariamente la mejor situación ya que a más muestras

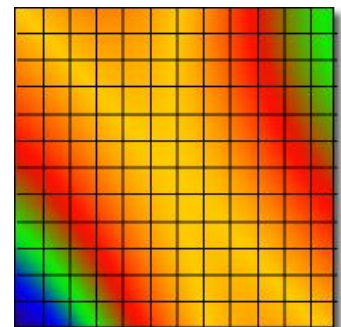
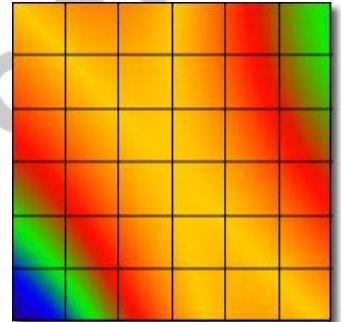


se requiere más capacidad de procesamiento y más espacio para almacenar la información y existen situaciones en las que es posible que con pocas muestras sea suficiente.



Entonces: ¿cómo determinar cuál es la frecuencia de muestreo adecuada? Comparemos ahora 2 y 3, en 3 la señal varía más lentamente, al haber desaparecido el pico es posible lograr poca pérdida de información aún teniendo menos muestras, la conclusión es que, con señales que varían lentamente no es necesaria una alta frecuencia de muestreo.

Llevado al campo de la fotografía o la captura digital de imágenes en general, el tiempo no interviene ya que se obtiene una imagen estática, sin embargo, la escena que se está capturando se desarrolla en un plano y muestra una variación continua de valores de iluminación y de colores en toda la superficie de este. En principio la imagen se compone de infinitos puntos, para poder capturarla y almacenarla se la divide en filas y columnas que dan como resultado pequeños sectores (rectangulares o cuadrados) cada uno de esos sectores es una de las muestras, vale decir que en el caso de imágenes estáticas se cambia el dominio temporal del muestreo por el dominio espacial (quizás debería decirse superficial pero el término espacial es igualmente válido y permitiría extender el concepto al muestreo de volúmenes, aunque no sea este el caso). Cada uno de los sectores en los que se muestrea la imagen se denomina *pixel* (picture element), y la frecuencia de muestreo tiene su equivalente en la *resolución*, así como la frecuencia de muestreo mide en muestras por segundo, la resolución indica en píxeles por pulgada (o algunas unidades equivalentes), puede ocurrir que la resolución en sentido horizontal no sea igual a la que se toma en sentido vertical, en general en los sensores de las cámaras fotográficas se da simplemente el número de píxeles del sensor.



Como puede comprenderse de las dos imágenes que se muestran, cuando mayor el tamaño del cuadrado en que se divide mayor error se cometerá al tomar la muestra, por otro lado, cuanto menor sea tendremos más muestras para procesar y almacenar. El tamaño de los píxeles es inversamente proporcional a la resolución asumiendo que el tamaño del sensor es fijo, cuando los píxeles se hacen tan grandes que son visibles se dice que la imagen está *pixelada* lo cual es una forma de decir que no es una buena reproducción del original lo que, en términos de muestreo significaría que esta sub-muestreada.

La Digitalización

El resultado del proceso de muestreo es un conjunto de *valores eléctricos* que corresponden a los valores de la señal eléctrica en los instantes de muestreo, sin embargo estos valores no son adecuados para ser manipulados por un sistema digital pues este tipo de sistemas no trabaja con señales eléctricas sino con números binarios cuyo valor representa al valor de las muestras, entonces el paso siguiente es la conversión de los valores obtenidos durante el muestreo en números binarios, a este paso se lo llama digitalización.

Numeración Binaria

Antes de continuar necesitamos revisar brevemente los conceptos relacionados con la numeración binaria pues esto nos ayudará a comprender lo que sigue.

El sistema de numeración que utilizamos a diario es el decimal, se denomina así pues en él todos los números son representados por un conjunto de diez símbolos, los números del 0 al 9, es decir que, con estos diez símbolos podemos escribir cualquier número.

Por cuestiones que sería largo de exponer aquí, en los sistemas electrónicos de procesamiento de datos, operar utilizando números en el sistema decimal resulta sumamente dificultoso, sin embargo, si se usan solo dos símbolos las operaciones son mucho más sencillas de realizar, en consecuencia en sistemas de este tipo, todos los números se representan con solo dos símbolos: 0 y 1 (en realidad, internamente, se usan señales eléctricas que representan a estos dos valores). A un sistema de numeración que utiliza solo dos símbolos se lo llama *binario* y, así como a cada cifra en un número del sistema decimal se le llama dígito, cada cifra binaria se denomina *bit* (contracción de Binary Digit o Dígito Binario).

La tabla muestra algunos de los 255 primeros números del sistema decimal y su correspondiente binario, se observa que el costo de reducir el número de símbolos implica un incremento de la cantidad de cifras necesarias para representar cada número (consideremos por ejemplo que con 3 cifras decimales podemos representar 1000 números, del 0 al 999, en binario para representar esa cantidad de números se requieren 10 bits), sin embargo este aumento en la cantidad de cifras es fácilmente manejado por los sistemas digitales de procesamiento.

Al igual que en el sistema decimal, en el binario los números tienen diferentes longitudes en bits, sin embargo, en los sistemas digitales de procesamiento todos los números tienen la misma cantidad de cifras, la unidad de almacenamiento binaria es un número de 8 bits llamado *byte*, como se ve en la tabla, con 8 bits pueden representarse los números desde el 0 hasta el 255, si se necesita almacenar o representar números más grandes se recurre, simplemente, a aumentar la cantidad de bytes, con dos bytes puede representarse hasta el número 65535, tres bytes permiten representarse hasta el 16777215, etc.

Digitalizando Muestras

El proceso de digitalización (denominado Conversión Analógica Digital o ADC por su sigla en inglés), consiste básicamente en asignar a cada muestra un número binario que sea *representativo* del valor de dicha muestra. Este valor no tiene por qué coincidir con el real (el sistema de procesamiento se encargará luego de calcularlo), si por ejemplo, tenemos una muestra de una variable cuyo valor es 30, no necesariamente el número binario que la represente será 11110 (30 decimal) sino que podría ser otro dependiendo de los valores que hayamos elegido para la conversión.

Un valor importante en la conversión A/D es el número de bits ya que esto nos dará la

0	00000000
1	00000001
2	00000010
3	00000011
4	00000100
5	00000101
6	00000110
7	00000111
8	00001000
9	00001001
...	...
14	00001110
15	00001111
16	00010000
...	...
31	00011111
32	00100000
33	00100001
...	...
63	00111111
64	01000000
65	01000001
...	...
253	11111101
254	11111110
255	11111111

exactitud con la que se obtenga y almacene el dato y, en consecuencia, con la que podremos reproducirlo luego, una vez elegido el número de bits de la conversión (8, 10, 16, etc.) se establece un conjunto de valores posibles que pueden ser representados (0 a 255 para 8 bits, 0 a 1023 para 10 bits, etc.) y si el valor de una muestra no tiene correspondencia directa con ninguno ellos se le asigna el valor binario más cercano.

Por ejemplo, supongamos que utilizamos 8 bits en nuestra conversión A/D, esto significa que podremos representar únicamente 256 valores, desde 0 (0000 0000) hasta 255 (1111 1111), en fotografía estos valores podrían usarse para representar niveles de grises desde el negro (0) hasta el blanco (255), supongamos ahora que el sensor captura un valor de gris que resulta ser 132.6, una vez efectuada la conversión el gris de ese píxel deberá ser 133 que corresponde al valor más cercano. Si hubiéramos utilizado 10 bits, el blanco correspondería al 1023 (11 1111 1111) y ahora al mismo valor de gris le correspondería el 531.96 que se representaría como 532, con lo cual el error, o sea la diferencia entre el valor medido y el valor digitalizado se habrá reducido. En otras palabras: el error máximo esperado como consecuencia de la digitalización será la mitad del salto entre dos valores el cual depende de la cantidad de bits involucrados, con 8 bits el salto entre dos valores es $1/255$, con 10 bits, $1/1023$, con 14 bits, $1/16383$.

Es interesante notar que luego, del proceso de digitalización, la señal continua inicial se ha convertido en una señal discreta ya que solamente puede poseer los valores correspondientes a los saltos de digitalización y no incluirá valores intermedios del valor de entrada, no obstante esto no representa un inconveniente pues en tanto el salto sea menor que la mínima diferencia capaz de detectar el sistema que recibirá los datos, obviamente no será percibido. El ojo humano tiene capacidad para percibir aproximadamente 65 niveles de gris, esto quiere decir que si se utilizan 7 bits (128 niveles) no podrá detectar saltos en una escala de grises y los verá como una transición continua, mucho menos cuando se utilizan los 256 niveles propios de los 8 bits (en realidad la respuesta de ojo no es igual para todos los niveles de gris y es capaz de detectar de diferente manera en los claros que en los oscuros).

La Calidad de Imágenes en las Cámaras Fotográficas

En este punto estamos en condiciones de comprender algunos de los parámetros que los fabricantes de cámaras fotográficas nos especifican en relación con los sensores y con calidad de la imagen. El parámetro más popular en este sentido es la resolución que, como

Nikon D-5100	16,2 Mpx	14 bits
Nikon D-7100	24,1 Mpx	12-14 bits
Nikon D-4	16,2 Mpx (FF)	12-14 bits
Canon EOS Rebel SL1	18,0 Mpx	14 bits
Canon EOS 60-D	18,0 Mpx	14 bits
Canon EOS-1D X	18,1 Mpx (FF)	14 bits

ya se explicó, viene dada en megapíxeles, adicionalmente se especifica la relación de aspecto o sea la relación entre el ancho y el alto de la imagen (4:3, 16:9, etc.), con estos dos datos se posible saber fácilmente cuántos píxeles de ancho y cuántos de alto presenta.

La tabla muestra valores de resolución de varias cámaras réflex de tipo semiprofesional y profesional (las consideradas '*profesionales*' son aquellas en las que se acompaña su resolución con FF que significa full-frame en relación con el tamaño del sensor), es interesante notar que el hecho de estar dentro del rango de las profesionales no implica que tengan mayor resolución, esto puede interpretarse entendiendo que más disminución en el tamaño del píxel no aporta más calidad a la imagen. Más adelante volveremos sobre esto.

El otro parámetro, tal vez menos popular pero no por eso menos importante, es el número de bits, este no es determinado por el sensor sino por el conversor A/D, aunque obviamente el sensor debe ser el adecuado para el número de bits utilizados (todo sensor introduce un error en la medición el cual no debería ser mayor que el introducido por el conversor

A/D). Puede verse que todas las cámaras citadas digitalizan en 14 bits, en aquellas en que se indica 12-14 es porque la cámara ofrece la posibilidad de capturar las imágenes en dos calidades, la menor calidad no implica menor necesidad de almacenamiento (en ambos casos se necesitan 2 bytes para almacenar el dato) sino más velocidad en la captura ya que obtener un valor de 12 bits es un poco más rápido que obtener uno de 14 bits, si la pequeña diferencia de tiempo obtenida se multiplica por el número de bits dado por la resolución se logran diferencias de tiempo que en algunos casos deberían ser tomadas en consideración (disparos en ráfaga, horquillado, etc.). Podríamos preguntarnos por qué no se producen imágenes con más bits por píxel, el hecho es que no tiene sentido, fundamentalmente porque, aunque los medios de reproducción (monitores, impresoras) estuvieran en condiciones de reproducir mayor calidad, lo cierto es que nuestro sentido de la vista no está en condiciones de apreciar la mejora.

En este punto podría argumentarse que los monitores entregan imágenes con una profundidad de color de 24 bits, casi el doble de los 14 que ofrece una cámara, sin embargo debemos entender que el monitor reparte los 24 bits en 8 por canal y de hecho, la cámara utiliza los 12 o 14 bits en cada canal de color y otros 14 en el canal de iluminación (posteriormente, si se convierte a jpeg, la imagen tendrá 8 bits en cada canal RGB).

El tamaño del sensor

El tamaño del sensor es un parámetro asociado a las cámaras digitales que pocas veces es tenido en cuenta. Las medidas típicas de los sensores están entre desde algunos milímetros por lado en las cámaras compactas hasta más de 30 mm en su lado menor en las denominadas de *formato medio*, entre las consideradas *profesionales* el tamaño es aproximadamente el de un fotograma de una película de 35mm y se denomina *full-frame*.

Ahora bien, ¿cómo influye el tamaño del sensor en la calidad de la imagen capturada? ¿porqué las cámaras profesionales, pudiendo tener más píxeles no los tienen?

Resulta claro que, una vez fijado el tamaño del sensor, a mayor cantidad de píxeles mas pequeños deben ser estos, el menor tamaño implica menos superficie para capturar la luz y por lo tanto menor sensibilidad, esto significa que se necesita más cantidad de luz para excitarlos, las consecuencias directas de esto son: más ruido con valores ISO altos y más ruido en las sombras. Adicionalmente, el mayor tamaño en los píxeles del sensor provee mayor rango dinámico. Debido a sus sensores más grandes, las DSLRs generalmente pueden tomar fotogramas de alta calidad en ISO 1600, 3200, o aún sensibilidades más altas, mientras que las cámaras compactas tienden a producir imágenes granuladas incluso en ISO 400. En definitiva, el uso de mayores resoluciones no solo no mejoraría la calidad de la imagen sino que, por el contrario, haría perder algunas ventajas asociadas a los sensores de mayor tamaño.

