

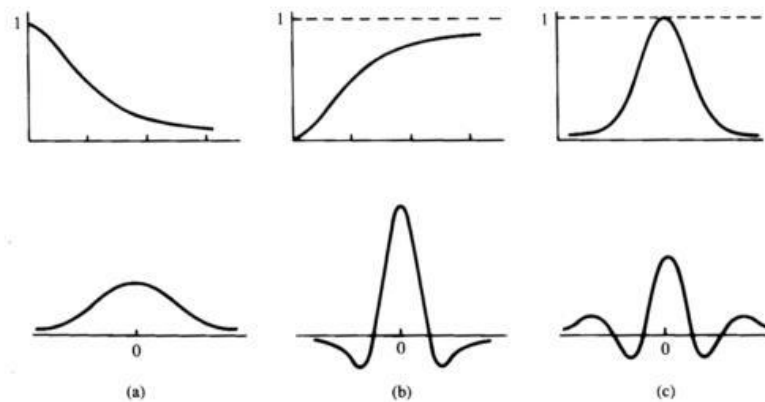
Técnicas de procesamiento de imagen

3. Filtrado Espacial: La convolución

3.0. Introducción

Los filtros espaciales tienen como objetivo modificar la contribución de determinados rangos de frecuencias a la formación de la imagen. El término espacial se refiere al hecho de que el filtro se aplica directamente a la imagen y no a una transformada de la misma, es decir, el nivel de gris de un píxel se obtiene directamente en función del valor de sus vecinos.

Los filtros espaciales pueden clasificarse basándose en su linealidad: ***filtros lineales*** y ***filtros no lineales***. A su vez los ***filtros lineales*** pueden clasificarse según las frecuencias que dejen pasar: los ***filtros paso bajo*** atenúan o eliminan las componentes de alta frecuencia a la vez que dejan inalteradas las bajas frecuencias; los ***filtros paso alto*** atenúan o eliminan las componentes de baja frecuencia con lo que agudizan las componentes de alta frecuencia; los ***filtros paso banda*** eliminan regiones elegidas de frecuencias intermedias.



Arriba: secciones de filtros en frecuencia con simetría circular.

Abajo: secciones correspondientes a filtros espaciales. (a) Filtro paso bajo. (b) Filtro paso alto. (c) Filtro paso banda.

La forma de operar de los filtros lineales es por medio de la utilización de máscaras que recorren toda la imagen centrando las operaciones sobre los píxeles que se encuadran en la región de la imagen original que coincide con la máscara y el resultado se obtiene mediante una computación (suma de convolución) entre los píxeles originales y los diferentes coeficientes de las máscaras.

Los ***filtros espaciales no lineales*** también operan sobre entornos. Sin embargo, su operación se basa directamente en los valores de los píxeles en el entorno en consideración. Unos ejemplos de filtros no lineales habituales son los filtros mínimo, máximo y de mediana que son conocidos como ***filtros de rango***. El filtro de mediana tiene un efecto de difuminado de la imagen, y permite realizar una eliminación de ruido de forma eficaz, mientras que el filtro de máximo se emplea para buscar los puntos más brillantes de una imagen produciendo un efecto de ***erosión***, y el filtro de mínimo se emplea con el objetivo contrario, buscar los puntos más oscuros de una imagen produciendo un efecto de ***dilatación***.

Otra clasificación de los filtros espaciales puede hacerse basándose en su finalidad, y así tenemos los ***filtros de realce*** (Sharpening) para eliminar zonas borrosas o ***filtros de suavizado*** (Smoothing) para difuminar la imagen. también tenemos los filtros diferenciales que se componen de varios tipos de máscaras (Laplaciano, Prewitt, Sobel, etc.), y se utilizan para la ***detección de bordes***. El proceso de detección de bordes se basa en realizar un incremento del contraste en las zonas donde hay una mayor diferencia entre las intensidades, y en una reducción de éste donde no tenemos variación de intensidad.

3.1. Convolución

El tratamiento de imágenes más empleado y conocido, es el tratamiento espacial también conocido como ***convolución***. Las convoluciones discretas son muy usadas en el procesado de imagen para el suavizado de imágenes, el afilado de imágenes, detección de bordes, y otros efectos. Mediante este proceso se calcula el valor de un determinado punto en función de su valor y del valor de los puntos que le rodean, aplicando una simple

operación matemática en función de la cual se obtendrá un valor resultante para el punto en cuestión.

La operación de la convolución puede representarse como la siguiente operación:

$$g(x,y) = f(x,y) \otimes a(x,y)$$

donde $a(x,y)$ es la función respuesta al impulso del filtro a aplicar (o **máscara de convolución**), $f(x,y)$ es la imagen de entrada y $g(x,y)$ es la imagen filtrada. Las expresiones matemáticas para el caso bidimensional son las siguientes:

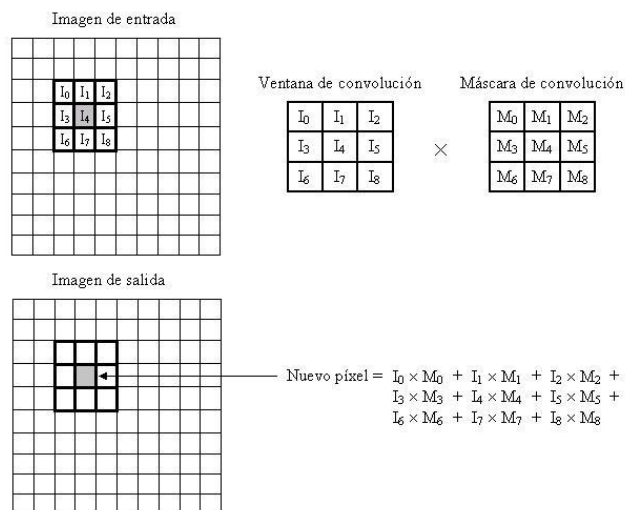
$$\text{Caso continuo} \quad g(x,y) = f(x,y) \otimes a(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\chi, \zeta) a(x-\chi, y-\zeta) d\chi d\zeta$$

$$\text{Caso discreto} \quad g[m,n] = f[m,n] \otimes a[m,n] = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f[j,k] a[m-j, n-k]$$

La operación matemática en que consiste la convolución es simplemente una suma ponderada de píxeles en el vecindario del píxel fuente. Los pesos son determinados por una pequeña matriz llamada máscara de convolución, que determina unos coeficientes a aplicar sobre los puntos de una determinada área. Las dimensiones de la matriz son normalmente impares e iguales, de forma que se pueda determinar un centro de una matriz cuadrada. La posición del valor central se corresponde con la posición del píxel de salida.

Una ventana deslizante, llamada **ventana de convolución**, se centra en cada píxel de una imagen de entrada y genera nuevos píxeles de salida. Para aplicar la máscara a esa zona se multiplican los valores de los puntos que rodean al píxel que estamos tratando por su correspondiente entrada o coeficiente en la máscara y luego se suman esos productos. El resultado es el nuevo valor para el píxel central, tal y como se puede ver en la siguiente figura. El proceso es bastante repetitivo, algo costoso en tiempo en función del tamaño de la imagen, pero sencillo y eficaz.

Es muy importante colocar los nuevos píxeles en una nueva imagen. Si el recién generado píxel reemplaza al antiguo píxel, éste será usado para calcular el valor del siguiente píxel nuevo.



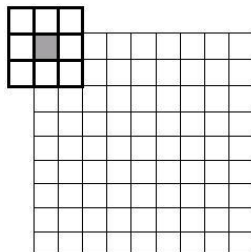
La suma de los pesos en la máscara de convolución afecta a la intensidad general de la imagen resultante. Muchas máscaras de convolución tienen coeficientes que suman un total de 1 (como los filtros paso bajo usados en el suavizado de imagen). En este caso, la imagen convolucionada tendrá la misma intensidad media que la imagen original. Algunas máscaras de convolución (como las usadas en detección de bordes) tienen coeficientes positivos y negativos y suman un total de 0, en esta situación se generarán valores de píxeles negativos. En caso de que nos salgamos del rango impuesto para la imagen $f(x,y)$, bien porque necesitemos utilizar máscaras cuya suma de valores sea mayor que la unidad o porque utilicemos máscaras con coeficientes negativos, debemos normalizar el resultado aplicando la función más adecuada en cada caso.

Existe una gran variedad de máscaras que realizan diferentes acciones sobre una imagen. Las hay que suavizan los bordes, otras que limpian la imagen, otras que la oscurecen, etc. Las máscaras, como operadores lineales más utilizados, suelen ser de los de paso bajo, paso alto y detección de bordes. Por ejemplo, mediante la siguiente matriz no se realiza ningún cambio a la imagen:

0	0	0
0	1	0
0	0	0

El tamaño de la máscara podría ser arbitrario, e incluso no restringido a matrices cuadradas, por lo que se podría utilizar perfectamente matrices rectangulares. Pero nos limitaremos a que la mayoría de los procesados utilicen máscaras cuadradas de tamaño 3x3, ya que para comprender su funcionamiento son las máscaras más simples. Una cosa que se aprende con rapidez es que cuando la máscara de convolución aumenta de tamaño, la carga computacional aumenta exponencialmente.

La primera cuestión al implementar una función de convolución es como tratar los bordes de la imagen. Cuando la ventana de convolución se centra en el primer píxel de una imagen en (0,0), la ventana deslizante sobresale de la imagen en el borde superior y en el izquierdo. ¿Qué valores de la imagen deben ser multiplicados por esos coeficientes de convolución que sobresalen de los bordes?

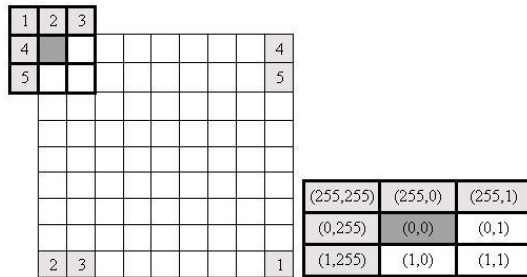


Hay varias maneras para solucionar este problema.

- La primera solución es tratar las celdas vacías en la ventana de convolución como ceros. Esto se conoce como zero-padding. Es fácil de realizar pero no es una buena idea si los bordes de la imagen resultante son tan importantes como el resto de la imagen.
- La siguiente solución es empezar la convolución en la primera posición donde la ventana no sobresalga de la imagen. Si la máscara de convolución es de tamaño 3x3, se empezaría convolucionando con el píxel en (1,1) en vez del píxel en (0,0).

Este método es sencillo de implementar. En la imagen de salida, los bordes convolucionados son copiados para crear una imagen con el mismo tamaño que la imagen de entrada.

- Otros métodos amplían la imagen antes de convolucionarla. Una forma de hacerlo es duplicar los bordes. Usando una máscara 3x3, se copiarían la filas superior e inferior, así como las columnas izquierda y derecha.
- El otro método es “envolver” la imagen, es decir, considerar como píxel contiguo al del borde izquierdo, el píxel del borde derecho y viceversa, así como con los del borde superior e inferior. Si se quiere convolucionar una imagen 256x256 con una máscara de convolución de 3x3, la primera ventana de convolución opera con los píxeles en las posiciones que se ven en la siguiente figura. Este último método ha sido el empleado en la implementación de la aplicación.



3.2. Suavizado

El suavizado de imágenes se utiliza normalmente bajo dos supuestos: dar a una imagen un difuminado o efecto especial y para la eliminación de ruido, este último caso se analizará con más detalle en la sección 3.5-Eliminación de ruido.

El *suavizado* o *filtrado espacial paso bajo* borra los detalles más finos de una imagen, es decir, conlleva una atenuación de las altas frecuencias, mientras se mantienen las bajas y medias frecuencias. Tiene un buen número de aplicaciones: algunas veces se emplea para simular una cámara desenfocada, o para restar énfasis a un fondo; mientras los fotógrafos usan un filtro de cámara para conseguir ese efecto, los artistas informatizados emplean filtros digitales.

El suavizado se alcanza mediante la convolución, y es fácil ver en la máscara de convolución que el suavizado es simplemente el promedio del vecindario. Promediar tiende a eliminar los valores extremos de un grupo, así los píxeles extremadamente claros u oscuros pueden hacerse más grises dependiendo de los vecinos del píxel. Cuanto más grande es la máscara, mayor es el efecto de suavizado y mayor el tiempo de cómputo requerido.

3.2.1. Filtros Paso Bajo

Las máscaras de los filtros paso bajo deben tener todos sus coeficientes positivos y la suma de ellos debe ser igual a uno. Las máscaras de tamaño 3x3 más utilizadas son las siguientes:

- La llamada propiamente paso bajo
- La llamada "Smooth"

0	1/10	0	1/16	2/16	1/16
1/10	6/10	1/10	2/16	4/16	2/16
0	1/10	0	1/16	2/16	1/16
Paso Bajo			Smooth		

Las dos máscaras tienen el mismo efecto sobre la imagen, pero con la llamada *Smooth*, al tener los coeficientes un mayor valor, el efecto de difuminado es mucho más fuerte. En el caso de la máscara *Smooth* debemos darnos cuenta que la suma de los valores es 16 y no 1, por lo que los valores obtenidos con ella para los puntos de la imagen, se nos pueden salir del rango válido (en nuestro caso 255), por lo que el resultado debe ser normalizado dividiéndolo por la suma de la máscara, en este caso 16. En el caso de la máscara *Paso Bajo* la suma total es de 10, valor por el cual dividimos para normalizar el resultado.

El filtrado con una máscara paso bajo, como la *Smooth*, produce un efecto de difuminado de los bordes y emborronamiento de la imagen filtrada con respecto a la imagen original. Esta pérdida de los detalles pertenecientes a las altas frecuencias es lo que caracteriza a todos los filtros paso bajo o de suavizado.

Las máscaras vistas anteriormente no son las únicas que producen un efecto paso bajo, pero si son las más extendidas. Cada uno puede diseñar su propia máscara, sólo hay que seguir las pautas dadas anteriormente. Las siguientes máscaras son ejemplos propios:

1/12	1/12	1/12	1/10	0	1/10	1/8	1/8	1/8
1/12	4/12	1/12	1/10	4/10	1/10	0	2/8	0
1/12	1/12	1/12	1/10	0	1/10	1/8	1/8	1/8

3.2.2. Filtro de Media

De entre la multitud de máscaras de filtro paso bajo destaca especialmente la máscara de **media**, que es la que efectúa el promedio de los valores del entorno. El filtro espacial de media reemplaza el valor de un píxel por la media de los valores del punto y sus vecinos. Su efecto es el difuminado o suavizado de la imagen y se aplica junto con el de mediana para eliminar ruidos. Este filtro lo implementamos con la siguiente máscara para un tamaño 3x3:

1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9
1/9	1/9	1/9

Normalmente el tamaño de la máscara se toma en función de la cantidad de suavizado que queramos aplicar en cada momento. La visualización del resultado es el único medio de saber si hemos elegido el tamaño adecuado.

Se puede observar que el efecto final del filtro de la media es un suavizado de la imagen por reducción o redistribución del valor de los píxeles. Este filtro tiene el resultado

opuesto a los de detección de bordes, donde el objetivo de los filtros es acentuar las diferencias, por esta razón el filtro de la media es un filtro paso bajo. También hay que notar que este filtro no modifica la imagen en las zonas donde el valor de los píxeles son el mismo, en oposición a los detectores de bordes que ponen estas regiones a cero.

En resumen, la media, como el resto de los filtros de suavizado, suaviza los contornos y otros detalles de forma de los objetos aparezcan menos definidos.

3.3. *Realce*

El objetivo principal del *realce* es el de destacar los detalles finos de una imagen o intensificar detalles que han sido difuminados, bien sea por error o bien por efecto natural del método de adquisición de la imagen. El realce de una imagen aumentará su contraste. Las utilidades del realce de las imágenes son variadas e incluyen aplicaciones que van desde la impresión electrónica y las imágenes médicas hasta las inspecciones industriales e incluso la detección autónoma de objetivos en las armas inteligentes.

Para la implementación del realce se utilizan, lo mismo que para el suavizado, técnicas basadas en la aplicación de filtros. El realce de una imagen se basa en el *filtro paso alto*. Un filtro paso alto eliminará los componentes bajos de frecuencia (como el medio de la imagen) y mostrará sólo los detalles altos.

Por lo general, la máscara de convolución usada comúnmente en el realce, es decir, la máscara de filtro paso alto, tiene un coeficiente positivo en su centro y coeficientes sobre todo negativos alrededor del borde externo.

3.3.1. Filtros Paso Alto

Para implementar un *filtro paso alto*, es decir permitir pasar las componentes de altas frecuencias y diluir las de baja frecuencia, es necesario que el filtro posea coeficientes negativos en la periferia y positivos en el centro. Así, cuando la máscara se encuentra sobre

una zona uniforme, la salida proporcionada por la máscara será 0 o próxima a dicho valor. Normalmente, este tipo de filtro elimina también el término de frecuencia 0 con lo que la imagen resultante deberá tener valores de intensidad negativos. Como sólo estamos considerando niveles positivos de gris, los resultados del filtrado paso alto necesariamente implican alguna forma de desplazamiento o cambio de escala para que al final los niveles de gris queden dentro del rango.

Las máscaras paso alto de tamaño 3x3 más utilizadas son las siguientes:

1	-2	1	-1	-1	-1	0	-1	0
-2	4	-2	-1	8	-1	-1	4	-1
1	-2	1	-1	-1	-1	0	-1	0
Paso Alto 1			Paso Alto 2			Paso Alto 3		

En estas máscaras, *llamadas propiamente paso alto*, hay que destacar que la suma de los coeficientes es cero. Así cuando la máscara está sobre una zona de la imagen de poco contraste o pequeña variación del nivel de gris, la salida de la máscara es cero o muy pequeña. Esto se traduce en que zonas uniformes con distintos niveles de gris son pasadas a un mismo nivel (el cero), con lo que perdemos información de la imagen. Además, eliminar los términos de baja frecuencia produce una disminución de la media de los niveles de gris, reduciendo significativamente el contraste global de la imagen.

Como se aprecia en el applet de ejemplo, el filtrado paso alto disminuye considerablemente el número de grises presentes en la imagen original, con lo que se reduce el contraste global de la imagen.

Como en el caso de los filtros paso bajo, las máscaras vistas anteriormente no son las únicas que producen este efecto, pero sí son las más extendidas. De igual forma se puede diseñar máscaras propias. Las siguientes máscaras, son ejemplos propios:

1	-2	1	-2	0	-2	-1	-2	-1
---	----	---	----	---	----	----	----	----

-2	4	-2	0	8	0	-2	12	-2
1	-2	1	-2	0	-2	-1	-2	-1

3.3.2. Filtros Sharpen

Tal y como hemos explicado anteriormente, al aplicar los filtros paso alto vistos en el apartado anterior se disminuye considerablemente el número de grises presentes en la imagen original, con lo que se reduce el contraste global de la imagen. Para realizar el realce propiamente dicho de la imagen empleamos los ***filtros Sharpen*** que constituyen una variación de las máscaras de realce ya vistas. Las máscaras Sharpen más comunes son las siguientes:

1	-2	1	-1	-1	-1	0	-1	0
-2	5	-2	-1	9	-1	-1	5	-1
1	-2	1	-1	-1	-1	0	-1	0
Sharpen 1			Sharpen 2			Sharpen 3		

Como podemos observar, en este caso aumentamos en uno el valor central de las máscaras paso alto para obtener la máscara Sharpen correspondiente.

3.4. Detección de bordes

Uno de los más importantes y sencillos procesos es la ***detección de bordes***. Importante porque de él se puede empezar a extraer importante información de la imagen, como pueden ser las formas de los objetos que la componen, y sencillo porque los operadores de detección de bordes son simples máscaras de convolución. Estos operadores son utilizados en aplicaciones para el reconocimiento de formas, aplicaciones industriales, militares, etc.

Dentro de las numerosas aplicaciones para la detección de bordes, los artistas digitales lo usan para crear imágenes con contornos deslumbrantes pues la salida de un

detector de bordes puede ser agregada a una imagen original para realzar los bordes. La detección de bordes es a menudo el primer paso en la segmentación de imagen, que es un campo del análisis de la imagen, y se utiliza para agrupar los píxeles en regiones para determinar una composición de la imagen. La detección de bordes también es usada en el registro de imagen, el cual alinea dos imágenes que podrían ser adquiridas en momentos separados y de sensores diferentes.

Los ***bordes de una imagen*** contienen mucha de la información de la imagen. Los bordes cuentan donde están los objetos, su forma, su tamaño, y también sobre su textura. Los ejes o bordes se encuentran en zonas de una imagen donde el nivel de intensidad fluctúa bruscamente, cuanto más rápido se produce el cambio de intensidad, el eje o borde es más fuerte. Un buen proceso de detección de bordes facilita la elaboración de las fronteras de objetos con lo que, el proceso de reconocimiento de objetos se simplifica. Para poder detectar los bordes de los objetos, debemos de detectar aquellos *puntos borde* que los forman.

En general, los bordes de objetos en una imagen los podemos distinguir por los cambios más o menos bruscos de valor entre dos o más píxeles adyacentes. Podemos realizar una clasificación general de los bordes según sea su dirección en:

- *Bordes verticales*, cuando píxeles conectados verticalmente tienen valores diferentes respecto de los anteriores o posteriores.
- *Bordes horizontales*, cuando tenemos píxeles conectados horizontalmente, y estos tienen distintos valores respecto de los anteriores o posteriores.
- *Bordes oblicuos*, cuando tenemos una combinación de las componentes horizontales y verticales.

La diferencia entre los valores de los píxeles nos indica lo acentuado del borde, de forma que a mayores diferencias tenemos bordes más marcados y a menores tenemos unos bordes suavizados.

Los filtros utilizados para la detección de bordes son ***filtros diferenciales***, que se basan en la derivación o diferenciación. Dado que el promediado de los píxeles de una

región tiende a difuminar o suavizar los detalles y bordes de la imagen, y esta operación es análoga a la integración, es de esperar que la diferenciación tenga el efecto contrario, el de aumentar la nitidez de la imagen, resaltando los bordes.

3.4.1. Derivada de primer orden

Muchas técnicas basadas en la utilización de máscaras para la detección de bordes utilizan máscaras de tamaño 3x3 o incluso más grandes. La ventaja de utilizar máscaras grandes es que los errores producidos por efectos del ruido son reducidos mediante medias locales tomadas en los puntos en donde se superpone la máscara. Por otro lado, las máscaras normalmente tienen tamaños impares, de forma que los operadores se encuentran centrados sobre los puntos en donde se calculan los gradientes.

$$\begin{aligned}\frac{\partial f(x,y)}{\partial x} &= \Delta_x = \frac{f(x+d_x,y) - f(x,y)}{dx} & \Delta_x &= f(i+1,j) - f(i,j) \\ \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} &= \Delta_y = \frac{f(x,d_y+y) - f(x,y)}{dy} & \Delta_y &= f(i,j+1) - f(i,j)\end{aligned}$$

Los operadores de gradiente común (o gradiente ortogonal) encuentran bordes horizontales y verticales. Estos operadores trabajan mediante convolución. Los operadores de *Prewitt*, *Sobel*, *Roberts* y *Frei-Chen* son operadores dobles o de dos etapas. La detección de bordes se realiza en dos pasos, en el primero se aplica una máscara para buscar bordes horizontales, y en el segundo paso buscamos los verticales, el resultado final es la suma de ambos. Se muestran algunas máscaras de convolución comunes a continuación. Los detectores de fila (horizontales) son H_h y los detectores de columna (verticales) son H_v :

<i>Roberts</i>	<i>Prewitt</i>	<i>Sobel</i>	<i>Frei-Chen</i>
0 0 -1	1 0 -1	1 0 -1	1 0 -1

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 H_h & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 2 & 0 & -2 & \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} \\
 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & -1 \\
 & -1 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 & -2 & -1 & -1 & -\sqrt{2} & -1 \\
 H_v & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & \sqrt{2} & 1
 \end{array}$$

En el siguiente applet se puede observar como cada una de las máscaras destaca un tipo de bordes, según su orientación. Los filtros diferenciales ayudan a detectar bordes pues las zonas que en la imagen original son de un tono uniforme (cualquiera sea) se transforman en un gris mediano (valores cercanos al cero). Mientras, los bordes, zonas donde hay un cambio abrupto de intensidad, son enfatizados. Algunos resultan negros (valores negativos) y otros blancos (valores positivos). Otros bordes no son enfatizados y quedan grises (valores cercanos al cero). Qué bordes son enfatizados y cómo es lo que diferencia a cada uno de los filtros.

Esta alteración de los bordes produce una ilusión de relieve. La imagen parece hundirse y sobresalir, iluminada por una fuente de luz. Los aclarados parecen ser más iluminados, y los oscurecidos parecen sombras. Las zonas que en la imagen original eran más oscuras parecen hundirse, mientras que las más claras parecen sobresalir. Es como considerar a la imagen como una superficie bidimensional en un espacio tridimensional, siendo el valor del píxel la altura de la superficie en ese punto.

3.4.2. Derivada de segundo orden

Los operadores diferenciales del gradiente discutidos en la sección anterior producen una respuesta grande a través de un área donde un borde está presente, esto es especialmente cierto para los bordes de poca inclinación. En cambio los detectores de bordes de la derivada de segundo orden proporcionan una localización mejor del borde.

Otra ventaja de los operadores de la derivada de segundo orden es que los contornos del borde detectados son curvas cerradas. Esto es muy importante en la segmentación de imagen. También, no hay respuesta a las áreas de variaciones lineales lisas en intensidad.

El *operador laplaciano* se define como una *derivada de segundo orden*, por lo cual obtiene resultados superiores a los anteriores y puede trabajar con imágenes donde las variaciones de intensidad no sean suficientemente abruptas para ellos. No obstante presenta una sensibilidad más grande frente al ruido y una ligera incapacidad para determinar la dirección de los bordes.

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f(x,y)}{\partial y^2}$$

Aunque el Laplaciano responde a las transiciones de intensidad, rara vez se utiliza en la práctica para la detección de bordes, pues tiene los siguientes inconvenientes:

- Los operadores basados en la primera derivada son sensibles al ruido en imágenes. El Laplaciano aún lo es más.
- Genera bordes dobles.
- No existe información direccional de los ejes detectados.

El Laplaciano es un buen ejemplo de un operador de derivada de segundo orden, se distingue de los otros operadores porque es omnidireccional, es decir, destacará los bordes en todas las direcciones. El operador Laplaciano producirá bordes más agudos que la mayoría de las otras técnicas, estos toques de luz incluyen pendientes positivas y negativas de la intensidad.

El borde Laplaciano de una imagen puede ser encontrado convolucionando con máscaras tales como:

$$\begin{array}{ccccccccc} 1 & -2 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ -2 & 4 & -2 & -1 & 8 & -1 & -1 & 4 & -1 \\ 1 & -2 & 1 & -1 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 \end{array}$$

La imagen resultante exhibe un cambio del signo en los bordes de la imagen. Estos cambios de signo son referidos como pasos cero. Después del operador de convolución, la imagen se debe procesar para encontrar que estos pasos cero y para fijar, por consiguiente, los píxeles de la salida.

Como se puede ver, las máscaras del operador Laplaciano coinciden con las máscaras de filtro paso alto vistas anteriormente. Esto se debe a que el Laplaciano detecta los bordes, es decir, las altas frecuencias de la imagen, sin considerar la orientación, por lo que además de utilizarse para la detección de bordes sirve también para el filtrado paso alto de imágenes.

3.5. Eliminación de ruido

Entendemos por **ruido en imágenes digitales** cualquier valor de un píxel de una imagen que no se corresponde exactamente con la realidad. Cuando se adquiere una imagen digital, ésta está contaminada por ruido. El ruido se debe, la mayoría de las veces al equipo electrónico utilizado en la captación de las imágenes (ruido de cuantificación de la imagen, efecto de niebla en la imagen... etc) y al ruido añadido en los tramos de transmisión (posibles interferencias o errores al transmitir los bits de información).

Vamos a distinguir dos clases diferentes de ruido:

- **Ruido gaussiano:** Se caracteriza por tener un espectro de energía constante para todas las frecuencias. Cuando se presenta este problema, el valor exacto de cualquier píxel es diferente cada vez que se captura la misma imagen. Este efecto, suma o resta un determinado valor al nivel de gris real y es independiente de los valores que toma la imagen.
- **Ruido impulsivo:** Se caracteriza por la aparición de píxeles con valores arbitrarios normalmente detectables porque se diferencian mucho de sus vecinos más próximos. La distribución viene dada por:

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & \text{si } r(x,y) < p/2 \\ L - 1 & \text{si } p/2 \leq r(x,y) < p \\ f(x,y) & \text{si } r(x,y) \geq p \end{cases}$$

•

donde $r(x,y)$ es un número aleatorio con distribución uniforme en $[0,1)$ y p es la probabilidad de ocurrencia del ruido aleatorio, es decir, el porcentaje de puntos de la imagen que se verán afectados por el ruido impulsivo del total de puntos de la imagen.

El ruido gaussiano tiene un efecto general en toda la imagen, es decir, la intensidad de cada píxel de la imagen se ve alterada en cierta medida con respecto a la intensidad en la imagen original. Por el contrario, se observa que el ruido impulsivo tiene un efecto más extremo sobre un subconjunto del total de píxeles de la imagen. Un tanto por ciento de los píxeles de la imagen toman arbitrariamente el valor extremo 0 o 255.

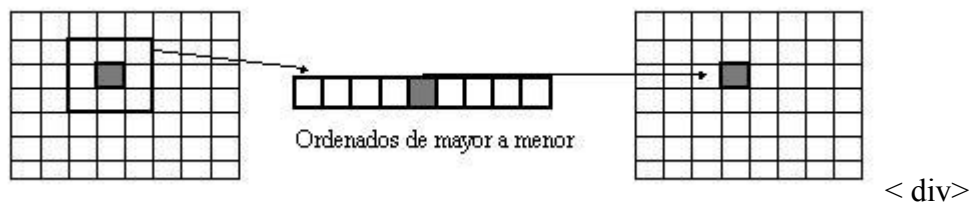
Una forma de eliminar el ruido de una imagen es mediante el suavizado de imágenes, visto en la sección 3.2. Dicho de otro modo, el filtrado paso bajo se emplea no sólo para el suavizado de imágenes, sino también para la eliminación de ruido. De hecho, el filtrado paso bajo es una manera efectiva de reducir el ruido gaussiano en una imagen, mientras que no es tan efectivo con el ruido impulsivo. Como promediar reduce los valores extremos de la vecindad del píxel, hacer un filtro de media tiende a reducir el contraste de las imágenes, pues los valores extremos, altos y bajos, son cambiados por valores medios.

El problema con la utilización de filtros paso bajo para eliminar el ruido de imágenes consiste en que los bordes de los objetos se vuelven borrosos. Los bordes contienen una cantidad enorme de información de una imagen. Filtrando el ruido impulsivo de una imagen, el **filtrado de mediana** puede ser una mejor opción. Los filtros de mediana hacen un mejor trabajo conservando los bordes.

3.5.1. Filtrado de Mediana

Los filtros de suavizado lineales o filtros paso bajo tienden a "difuminar los ejes" a causa de que las altas frecuencias de una imagen son atenuadas. La visión humana es muy sensible a esta información de alta frecuencia. La preservación y el posible realce de este detalle es muy importante al filtrar. Cuando el objetivo es más la reducción del ruido que el difuminado, el empleo de los *filtros de mediana* representan una posibilidad alternativa.

A menudo, las imágenes digitales se corrompen con ruido durante la transmisión o en otras partes del sistema. Esto se ve a menudo en las imágenes convertidas a digital de una señal de la televisión. Usando técnicas del filtrado de ruido, el ruido puede ser suprimido y la imagen corrompida se puede restaurar a un nivel aceptable. En aplicaciones de ingeniería eléctrica, el ruido se elimina comúnmente con un filtro paso bajo. El filtrado paso bajo es satisfactorio para quitar el ruido gaussiano pero no para el ruido impulsivo. Una imagen corrupta por ruido impulsivo tiene varios píxeles que tienen intensidades visiblemente incorrectas como 0 o 255. Hacer un filtrado paso bajo alterarán estas señales con los valores extremos sobre la vecindad del píxel. Un método mucho más eficaz para eliminar el ruido impulsivo es el filtrado de mediana.



En el filtrado de mediana, el nivel de gris de cada píxel se reemplaza por la mediana de los niveles de gris en un entorno de este píxel, en lugar de por la media. Recordar que la mediana M de un conjunto de valores es tal que la mitad de los valores del conjunto son menores que M y la mitad de los valores mayores que M , es decir en un conjunto ordenado de mayor a menor o viceversa, sería el valor de la posición central.

El filtro de la mediana no puede ser calculado con una máscara de convolución, ya que es un filtro no lineal. Podemos ver como este tipo de filtro elimina totalmente el punto que tenía un valor muy diferente al resto de sus vecinos. Como se selecciona el valor de

centro, el filtrado de mediana consiste en forzar que puntos con intensidades muy distintas se asemejen más a sus vecinos, por lo que observamos que el filtro de mediana es muy efectivo para eliminar píxeles cuyo valor es muy diferente del resto de sus vecinos, como por ejemplo eliminando ruido de la imagen.

Al implementar el filtro de mediana encontramos el mismo problema de bordes que teníamos en la convolución: cuándo la ventana de filtrado está centrada en el píxel (0,0), ¿cómo tratamos las celdas de la ventana que no contienen ningún píxel de la imagen? De las cuatro soluciones ya vistas anteriormente, se ha escogido la misma que para la convolución.

3.6. Dilatación / Erosión

El **filtrado de mínimo y de máximo** es muy similar al filtrado de mediana, junto con éste forman los **filtros de rango**. En vez de sustituir el píxel del centro por el valor medio, se utiliza el valor mínimo o máximo de la ventana. Estos filtros son eficaces en eliminar el ruido impulsivo extremo. El filtro mínimo elimina los puntos blancos (valor 255) mientras que el filtro máximo elimina los puntos oscuros (valor 0).

Con el filtrado de mínimo, un píxel se representa con el píxel más oscuro de su vecindad, por lo que la intensidad total de la imagen de salida será reducida. éste filtro tiende a "ensanchar" las líneas negras de la imagen, por esta razón también es conocido como **filtro de dilatación**.

Con el filtrado de máximo se aumenta la intensidad total de la imagen de salida. Este filtro también es conocido como **filtro de erosión**, debido a la propiedad que posee de "adelgazar" líneas. Si nuestra imagen posee líneas negras, al elegir el valor máximo de la vecindad de cada píxel, los valores más oscuros serán sustituidos por valores más altos con la consiguiente reducción de los píxeles cercanos al negro.

Otra aplicación posible del filtrado de mínimo y máximo es la eliminación de ruido. Estos filtros son eficaces en eliminar el ruido impulsivo extremo. El filtro de mínimo elimina los puntos blancos (valor 255) mientras que el filtro máximo elimina los puntos oscuros (valor 0). Aunque los filtros mínimos y máximos fallan en la eliminación del ruido impulsivo mezclado, pues los filtros mínimo y máximo tienden a realzar los puntos negativos y positivos, respectivamente. Una cascada de filtros máximos y mínimos puede quitar este ruido mezclado. Un filtro mínimo seguido de un filtro máximo se conoce como filtro de apertura.