



DEPARTAMENTO DE COMPUTACION

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Trabajo Práctico 2

Procesamiento de imágenes con SIMD

Organización del Computador II
Primer Cuatrimestre de 2016

Grupo: Yo no manejo el raiting, yo manejo un Rolls-Royce

Integrante	LU	Correo electrónico
Luis Enrique Badell Porto	246/13	luisbadell@gmail.com
Nicolas Bukovits	546/14	nicko_buk@hotmail.com
Kevin Frachtenberg	247/14	kevinfra94@gmail.com



Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires
Ciudad Universitaria - (Pabellón I/Planta Baja)
Intendente Güiraldes 2160 - C1428EGA
Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Rep. Argentina
Tel/Fax: (54 11) 4576-3359
<http://www.fcen.uba.ar>

Resumen

En el siguiente trabajo práctico, se busca analizar, estudiar y comprender el funcionamiento y rendimiento de la tecnología SIMD (Single Instruction Multiple Data) incluida en el sistema SSE de los procesadores Intel. Para esto, se realizaron tres filtros de imágenes (Cropflip, Sepia y Low Dynamic Range) en lenguaje C y en lenguaje ensamblador para aplicar sobre imágenes BMP, y luego se comparó el rendimiento entre ellos. Los resultados obtenidos de estos experimentos, fueron plasmados y analizados en este informe.

Índice

1. Introducción	3
1.1. Cropflip	3
1.2. Sepia	3
1.3. Low Dynamic Range	3
2. Desarrollo	4
2.1. Hipótesis y bases	4
2.2. Implementación y Análisis	4
2.2.1. Cropflip	4
2.2.2. Sepia	5
2.2.3. Low Dynamic Range	7
2.3. Comparación con diferentes implementaciones	9
2.3.1. Cropflip C vs Cropflip C	9
2.3.2. Sepia ASM vs Sepia ASM	10
2.4. Comparación entre Compiladores	11
3. Conclusiones y trabajo futuro	13

1. Introducción

1.1. Cropflip

El filtro cropflip recibe como parámetros extra dos tamaños y dos offset. Un tamaño y un offset para las filas, y los otros dos para las columnas. Lo que se hace con esto es recortar la imagen original en una nueva imagen e invertirla verticalmente. La imagen se recorta desde donde los offsets lo indican hasta el tamaño indicado.

Ejemplo: cropflip lena32.bmp 128 128 40 50



Figura 1: Antes del filtro cropflip (escala 25 %)

Figura 2: Des-
pués del filtro
cropflip (escala 50 %)

Para el caso de la implementación en lenguaje C, se toma pixel por pixel y se copia al lugar correspondiente (invirtiendo la imagen) en la imagen destino. Por otro lado, en el caso de la implementación en lenguaje ensamblador, se utilizan los registros XMM para leer y copiar de a 4 pixels en la imagen final.

1.2. Sepia

El filtro sepia, es el conocido filtro de imágenes que simula una foto antigua. Para lograr este efecto, lo que se hace es una suma de los canales de color (R, G, B). Llamaremos a esta suma “SumaRGB”) y luego se multiplica por un valor fijo para cada canal (0.5 para el canal R, 0.3 para el G y 0.2 para el canal B). Luego, manteniendo la transparencia en caso de haber, el pixel quedaría conformado por A = A, R = SumaRGB*0.5 , G = SumaRGB*0.3 y B = SumaRGB*0.2.

Al igual que en Cropflip, en el caso de C, se trabaja pixel por pixel, mientras que en el caso del lenguaje ensamblador se trabaja un poco diferente: Si bien se lee de a 4 pixeles de la imagen original, luego es necesario trabajar pixel por pixel ya que cada canal tiene un tamaño de 1 byte y si quisieramos realizar la suma de los 3 canales de los 4 pixeles en un solo registro, ésta no entraría en un byte. De esta forma, lo que se hace es expandir (unpack) cada pixel para que cada canal pase a tener un tamaño de word (2 bytes). Así, la suma máxima será de 255 + 255 + 255, y esto sí entra en un espacio de tamaño word. Sin embargo, las instrucciones que provee el procesador Intel para multiplicar por floats, nos obliga a realizar otra expansión (unpack) de cada pixel, pero esta vez de word a Double word (4 bytes, mismo tamaño que un float). Una vez están listos los cálculos de cada uno de los 4 pixels, se realizan 2 packs para llevar cada canal de doubleword a byte nuevamente.

Ejemplo: sepia foto.bmp

1.3. Low Dynamic Range

Este filtro, más conocido como LDR, se logra realizando una serie de cálculos en base a los 25 vecinos de cada pixel del interior de la imagen (si tomamos “interior” como 2 pixels hacia adentro desde cada borde) y un α pasado por parámetro, el cual puede ser un valor entre -255 y 255. Lo que hace es agregar o quitar luminosidad dependiendo de este α . El método para lograr este efecto es modificar cada canal de color (R,G,B) del pixel a revisar, a través de realizar una suma de los 3 canales de color de los 25-vecinos del pixel a editar (incluyendo el mismo pixel), luego se multiplica ese valor por el α y por el valor del canal del pixel en observación. Por último, se divide por un valor “Max”, que se da haciendo el cálculo del posible máximo del cálculo anterior ($255^*25^*3^*255$), se suma el valor del canal antes multiplicado y antes de guardarse, se satura a 0 y 255, que es el maximo de cada canal (ya



Figura 3: Antes del filtro sepia



Figura 4: Después del filtro sepia

que como el α puede ser negativo, es necesario tomar el caso en que quede un número negativo en el canal).

El caso de C es igual a sepia y cropflip: Se analiza pixel por pixel. El caso del lenguaje ensamblador es parecido, ya que no se pueden hacer cálculos tan grandes con 4 píxeles al mismo tiempo. Es por esto, que también se analiza pixel por pixel, pero para realizar el cálculo de la suma de los 25 vecinos, las multiplicaciones, la división, suma y saturación, se utilizan instrucciones SSE.

Ejemplo: ldr bob.bmp 100



Figura 5: Antes del filtro ldr



Figura 6: Después del filtro ldr

2. Desarrollo

2.1. Hipótesis y bases

Nosotros tenemos como hipótesis que dadas las herramientas que nos ofrece la tecnología SSE, y que nosotros mismos somos los que nos ocupamos de hacer una buena implementación en cada lenguaje, los algoritmos hechos en lenguaje ensamblador serán mucho más rápidos que los que están hechos en lenguaje C. Sabemos que parte del retraso que tiene el lenguaje C se debe a que es el compilador quien decidirá cómo optimizar el algoritmo implementado; esto es, traducir a código de máquina según la interpretación que le dé el compilador al código C. Es por esto que usaremos el flag O3 como caso de compilación extra, y así poder comparar distintos métodos de compilación sobre una misma implementación del lenguaje C. En cambio, para el caso del lenguaje ensamblador, es simplemente traducir a código de máquina, ya que son directamente las instrucciones que el procesador deberá ejecutar.

Para poder comparar cada implementación de los filtros, los mismos se ejecután reiteradas veces en imágenes de distintos tamaños. De cada ejecución, tomaremos el tiempo del clock antes de correr el programa y después de correrlo, y además observaremos la cantidad de ciclos de reloj que toma cada vez. Si bien esto puede traer problemas como por ejemplo el tema de los *outliers*, por razones de probabilidad y estadística, un promedio de cantidades grandes se acercará más a un promedio real.

2.2. Implementación y Análisis

2.2.1. Cropflip

Como se mencionó en la introducción, el filtro de Cropflip toma, en el caso de C, cada pixel y se copia de memoria a memoria. Sabemos que en la práctica esto solo funciona con un DMA, por lo que depende del compilador decidir cómo hacer las iteraciones para recorrer la imagen original y copiar

cada pixel a la nueva posición de memoria. Para el caso de ASM, se toma de a 4 pixels y se mueven a un registro XMM. dado que un pixel tiene tamaño de 32 bits y el tamaño del registro XMM es de 128, hacer esto es posible mediante instrucciones SSE (en este caso, movdqu). Luego lo mueve nuevamente a memoria en la posición correspondiente para ese pixel en la nueva imagen. Para este filtro, los tests que se realizaron consideraron distintos offsets y se realizaron sobre imágenes de distintos tamaños.

Los parámetros utilizados para esta experimentación fueron tamx: 128, tamy: 128, offsetx: i-128, offsety: i-128. Donde i es el tamaño de un lado de la imagen, que al ser cuadradas y múltiplos de 4, hace que sea indiferente el lado a elegir. Este Offset permite tener en cuenta el desplazamiento que debe realizarse para empezar a copiar la imagen, el cual es hasta el último bloque de 128x128 de la imagen original.

El primer caso de comparación es la implementación en C compilado sin el Flag O3 contra la implementación en ASM. En el siguiente gráfico se puede observar la diferencia de tiempo de cada implementación en ciclos de reloj en función del tamaño de la imagen en pixels.

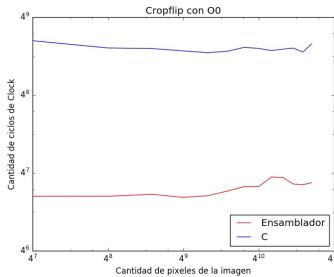


Figura 7: Comparación C sin optimizar vs ASM

Podemos observar de este experimento que la implementación en C es que si bien está basada en la misma idea que la implementación en ASM, el código generado por el compilador hace que tome mucho más tiempo resolver cada aplicación del filtro hasta el punto de crecer linealmente respecto del tamaño de la imagen. Podemos entender esto como una muestra de la diferencia en capacidad de procesamiento de los procesadores que utilizan la tecnología SSE contra los que no la utilizan o no tienen.

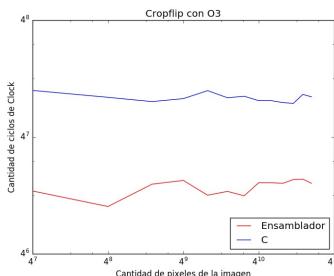


Figura 8: Comparación C con optimización O3 vs ASM

En este segundo experimento, comparamos la misma implementación C que el caso anterior pero esta vez compilado con el flag O3, el cual permite compilar el código utilizando tecnología SSE. Si bien se puede observar una amplia mejora respecto de la versión sin el flag O3, aún se nota mucha diferencia en comparación con la versión de ASM.

En el siguiente cuadro comparativo se utilizó también el flag que permite utilizar tecnología AVX, el cual contiene acceso a registros de 256-bits. A pesar de esto, no hubo una mejora de rendimiento respecto de la compilación sin el flag AVX.

2.2.2. Sepia

Para el caso del filtro sepia, la implementación realizada en C consiste en lo siguiente: recorrer la matriz entera de pixeles(imagen), y por cada uno calcular la suma de los tres canales. Luego multipli-

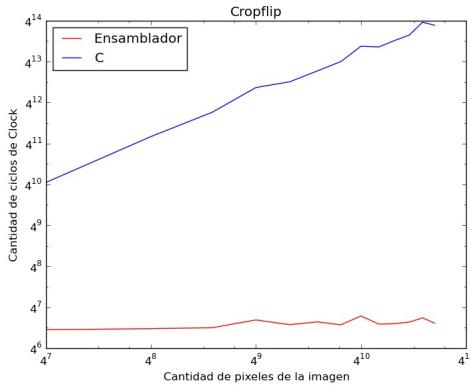


Figura 9: Comparación C con optimización O3 y AVX vs ASM

camos la suma de los canales por 0.5, y al mínimo valor entre éste y 255 se lo asignamos al canal rojo del nuevo pixel de la imagen a generar. La misma suma la multiplicamos por 0.3, calculamos el mínimo entre éste valor y 255, y finalmente se lo asignamos al canal verde del nuevo pixel. El mismo procedimiento se repite para el canal azul pero se multiplica el valor por 0.2. La transperencia se copia de manera exacta en el pixel del destino. La implementación realizada en lenguaje ensamblador consiste en traerse cuatro pixeles de por vez, lo que permite reducir la cantidad de accesos a memoria. Luego, por cuestiones de tamaños, no es posible trabajar en paralelo con los 4 pixeles, ya que hay que realizar la suma de todos los canales de los mismos, lo cual no es posible representar el valor máximo que puede llegar a dar esta suma en 8 bits, que es el tamaño de cada canal. Por eso fue necesario expandir los 8 bits de cada canal a 16 bits, por lo cual sólo podíamos trabajar con 2 pixeles en paralelo. Luego de realizada la suma de los canales de los 2 pixeles, se tuvo que convertir el tipo de dato entero a float, lo que también produjo otra expansión del tamaño de los datos de 16 bits a 32 bits ya que es el tamaño requerido para trabajar con floats y poder realizar las multiplicaciones por 0.5, 0.3 y 0.2 en cada caso particular. Para realizar las multiplicaciones se tuvo que hacer de a pixel por vez, debido a los 32 bits requeridos por cada canal. Luego se empaquetaron todos los resultados de los 4 pixeles individualmente, con cada canal en word, en un único registro, el cual se copia a memoria para poder copiar de a 4 pixeles. Básicamente, la mayor ganancia con esta implementación realizada en assembler, respecto de C, es que se leen y graban de a 4 pixeles por vez.

Para el caso de los experimentos, se corrieron varios tests sobre imágenes de distintos tamaños, que es la única variable que está en juego para este filtro ya que no recibe ningún parámetro adicional.

El primer caso de comparación es la implementación en C, sin usar ninguna optimización en la compilación, contra la implementación en ASM.

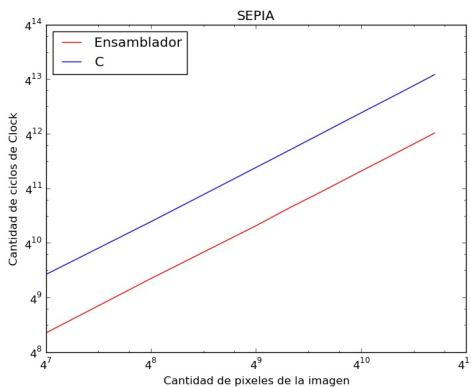


Figura 10: Comparación C sin optimización vs ASM

Se puede observar claramente una relación lineal entre el tamaño de la imagen y el tiempo de procesamiento en ambas implementaciones, lo cual resulta intuitivo debido a los algoritmos utilizados. También se aprecia una brecha entre el tiempo que tomó correr los experimentos en C y Assembler, resaltando que los experimentos en assembler requirieron menos ciclos de clock para procesarse. Esta

diferencia era la esperada, debido principalmente a la reducción de accesos a memoria gracias a la utilización de SSE en el código de Assembler. Se compararon las mismas implementaciones pero usando diferentes flags de optimizaciones para que realizara el compilador de C. Los resultados son los que arrojan los siguientes gráficos:

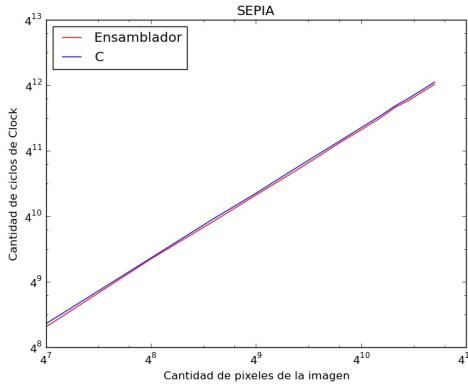


Figura 11: Comparación C con flag O3 vs ASM

Al utilizar el flag de optimización O3, el código generado por el compilador fue mucho más eficiente. Se observa en el gráfico una notable disminución de los tiempos de ejecución del código realizado en C, el cual casi iguala a la performance del realizado en ASM.

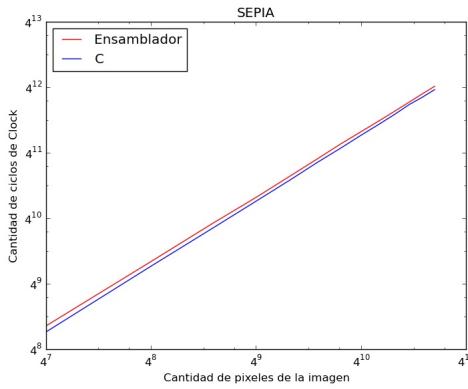


Figura 12: Comparación C con flag O3 y mavx vs ASM

Este fue el resultado más interesante. Al compilar con la opción de AVX, que es una tecnología con nuevas instrucciones y expande los registros de 128 bits a 256 bits, se observa que el código generado por el compilador de C es ligeramente más óptimo en términos de tiempo de procesamiento que el realizado por nosotros en assembler. Era un resultado igualmente esperable, ya que al utilizar registros de 256 bits se reducen aún más los accesos a memoria necesarios para traer y guardar pixeles. La relación lineal entre tamaño de imagen y tiempo de procesamiento se mantiene nuevamente en el experimento.

2.2.3. Low Dynamic Range

La idea específica de la implementación de este filtro tanto en C como en Assembler es ver pixel por pixel y realizar los cálculos de sus 25-vecinos por separado. Esto se hace de dos formas distintas dependiendo del lenguaje.

En el caso de C, primero se realiza la suma de los canales RGB de los 25-vecinos recorriendo pixel por pixel y canal por canal y eso se va guardando en una misma variable de tamaño int. Esto hace que por cada pixel y por cada canal, se realice un acceso a memoria.

Una vez obtenido la suma total, se la multiplica por el α pasado por parámetro, y se guarda en una nueva variable de tamaño Float. Luego, esta nueva variable se la multiplica por separado por cada canal RGB del pixel a modificar y se guarda el resultado tres variables más de tamaño Float. Después, se realiza la división por "Max", mencionado en la introducción de este informe y se le suma una vez más el canal correspondiente a modificar del pixel central, guardando otra vez cada resultado en una nueva variable de tamaño Float. Finalmente, se satura cada variable y se la guarda en cada canal a modificar. Esto se hace una cantidad de veces igual a la cantidad total de pixels que tiene la imagen

salvo por 2 líneas de píxeles en cada borde. Para ese caso, lo único que se hace es copiar los píxeles de la imagen original a la imagen destino.

Para el caso de Assembler, lo que cambia respecto de la implementación C son la cantidad de accesos a memoria. Esto se corrige utilizando la tecnología SSE, con los registros de 128-bits, en los cuales al momento de realizar los cálculos de los 25-vecinos se cargan primero los 4 pixels de cada fila y luego el último pixel de cada una. Además se utilizan instrucciones tales como *phaddw* y *paddw*, las cuales permiten realizar sumas de datos empaquetados en los registros mencionados. Para el caso de la multiplicación y división, se utilizan las instrucciones *pmulld* y *divps*, las cuales también trabajan con datos empaquetados en los registros de 128-bits. Para conservar el canal de transparencia, se utilizan las instrucciones *pextrd*, la cual extrae un Double Word a un registro de 32 bits, y luego *pinsrd*, la cual inserta de un registro de 32 bit un Double Word en un registro de 128 bits. Ambas instrucciones utilizan una máscara que indica cuál es el Double Word que se desea obtener o modificar.

En un primer experimento comparamos la implementación en C sin ningún tipo de optimización con la implementación en Assembler. En el gráfico resultante, se puede observar que ambas implementaciones crecen de manera lineal según el tamaño de la imagen. Sin embargo, la implementación en Assembler es aún más rápida que la de C.

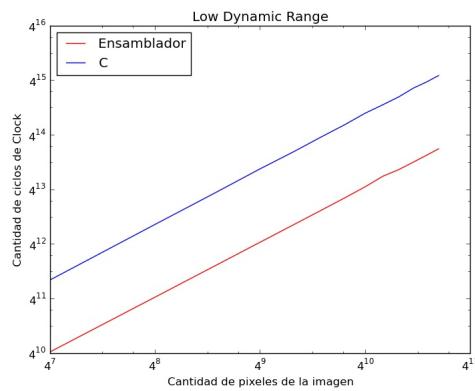


Figura 13: Comparación C sin optimización vs ASM

En el segundo experimento, comparamos la implementación C compilando con el flag de optimización O3. A continuación se puede ver el gráfico del mismo: Podemos analizar en este caso que el flag

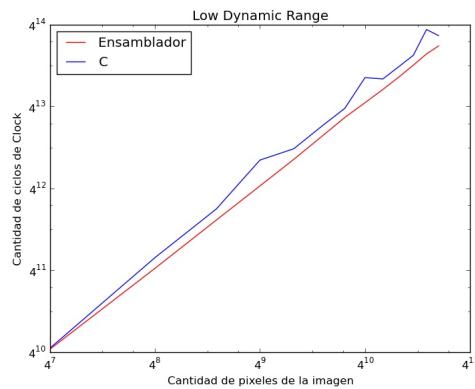


Figura 14: Comparación C con optimización O3 vs ASM

O3 realmente cambia el rendimiento de la implementación. Si bien ya no es tan lineal como lo era en el experimento anterior, ahora se acerca mucho al performance de la implementación en Assembler.

Como último experimento, agregamos el flag que permite utilizar los registros de 256 bits. Esta vez, se asemeja mucho al experimento anterior, pero sigue siendo un poco más rápido. El crecimiento de la cantidad de ciclos de procesador que toma, crece respecto del tamaño de la imagen de la misma forma que sin el flag AVX.

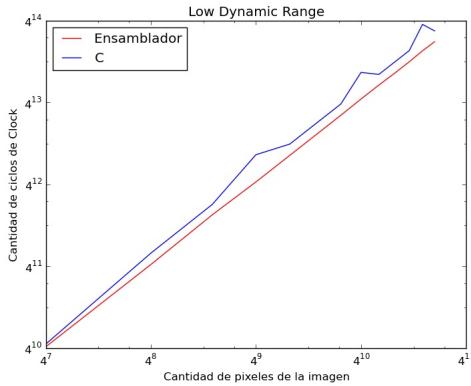


Figura 15: Comparación C con optimización O3 vs ASM

2.3. Comparación con diferentes implementaciones

Además de las implementaciones descriptas previamente en este informe, realizamos una segunda implementación en C de Croplip y otra en ASM de Sepia. Consideramos que no tendría mucho sentido hacer una segunda implementación en ASM de Cropflip ya que simplemente son copias de memoria a memoria con pequeños cálculos matemáticos, cosa que se podría hacer en C. En cambio, no hicimos una segunda implementación en C de Sepia ya que la diferencia sí podía hacerse notoria en ASM, no así en C.

2.3.1. Cropflip C vs Cropflip C

La diferencia entre las implementaciones de Croplip es que en la primera versión, se realizaban algunos cálculos sobre el siguiente pixel a copiar dentro del mismo loop, lo cual creemos que esto podría afectar en tamaños grandes de imágenes al aplicar el filtro. El siguiente gráfico muestra el tiempo que toma cada filtro para aplicarse en imágenes que varían en tamaño original pero no en el tamaño que se desea filtrar.

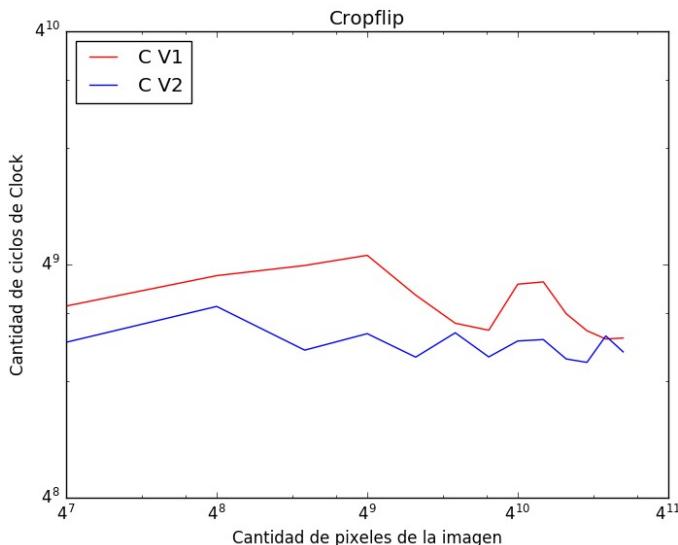


Figura 16: Comparación C sin optimización de Cropflip

Podemos notar como la segunda implementación supera a la primera comparando según los ciclos de reloj, pero no por mucha diferencia. Tal como esperábamos, esto ocurre porque son cálculos matemáticos simples, como sumas y restas, y no accesos a memoria o divisiones.

También comparamos estas dos implementaciones utilizando el flag O3 en el compilador y comparando nuevamente con la versión de ASM.

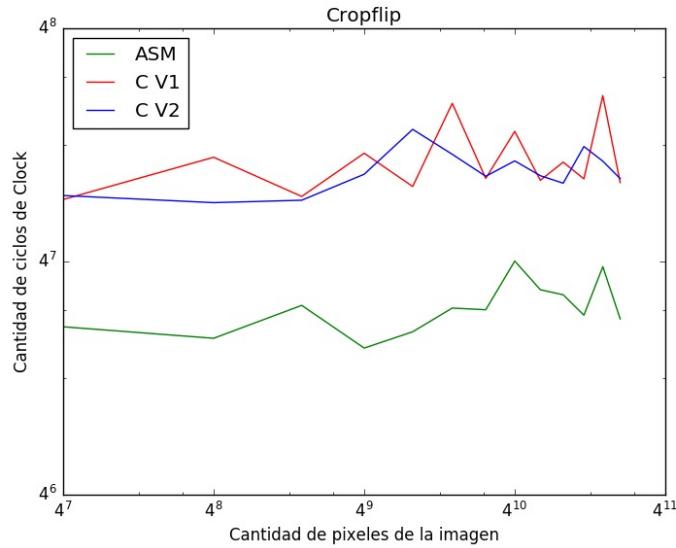


Figura 17: Comparación C vs ASM con optimización entre CropflipCv1, CropflipCv2 y CropflipASM

En este grafico podemos observar que utilizando el flag de optimización O3, en algunos casos la primera implementación en C de Cropflip puede llegar a ser levemente superior a la segunda. Sin embargo, esta comparación queda opacada cuando se tiene en cuenta la implementación en ASM, la cual es ampliamente más rápida que las otras dos.

2.3.2. Sepia ASM vs Sepia ASM

En esta segunda implementación el cambio principal fue que en lugar de multiplicar valores de punto flotante para realizar divisiones, lo que se hizo fue reemplazar esos valores por números enteros, multiplicandolos por 10 y luego dividir por los resultados. La multiplicación por 10 también debió hacerse en el número con el cual se iba a utilizar como dividendo para mantener la relación. Esta vez, esperamos nuevamente que la segunda implementación supere a la primera.

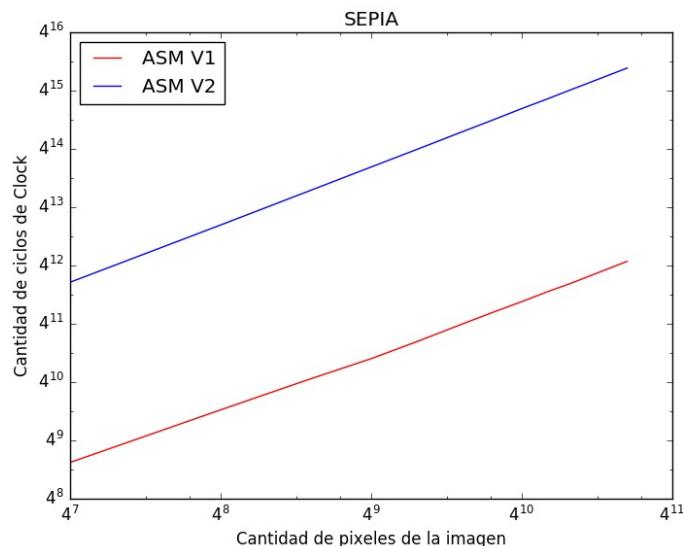


Figura 18: Comparación ASM

Nos llevamos una sorpresa al ver que la segunda implementación tomaba notoriamente mucho más tiempo que la primera. Llegamos a la conclusión que esto se debe a que realizar divisiones es mucho más costoso que multiplicar por unidades de punto flotante.

2.4. Comparación entre Compiladores

Un compilador no es mas que un programa que basicamente toma el codigo C y lo traduce a codigo de maquina. Existen varios para C, tales como como GCC (el cual se usa en gran parte de este trabajo), Clang y el Compilador de Intel. Lo que hicimos en este experimento fue compilar los filtros con GCC y Clang en sus versiones 5.3.1 y 3.8.0 respectivamente, para luego realizar la comparación. Nuestra hipótesis para este experimento es que el compilador de GCC optimice más el código producido que Clang, ya que en caso contrario, este último estaría instalado por defecto en muchos de los sistemas operativos existentes en lugar de GCC (teniendo en cuenta las muchas otras razones por las que puede no ser el caso).

Aqui el grafico de GCC

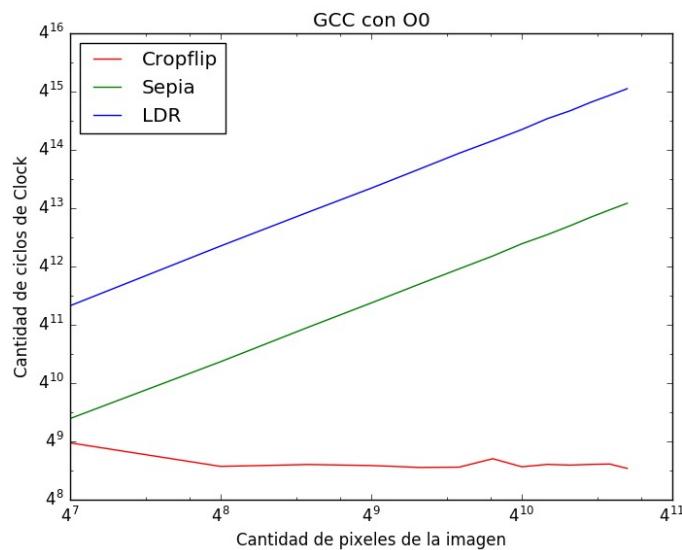


Figura 19: Filtros con GCC -O0

Aca vemos que Cropflip, es el filtro mas rapido. Es esperable ya que solo hace accesos a memoria mientras que sepia y cropflip hace operaciones aritmeticas

Aqui el grafico de Clang

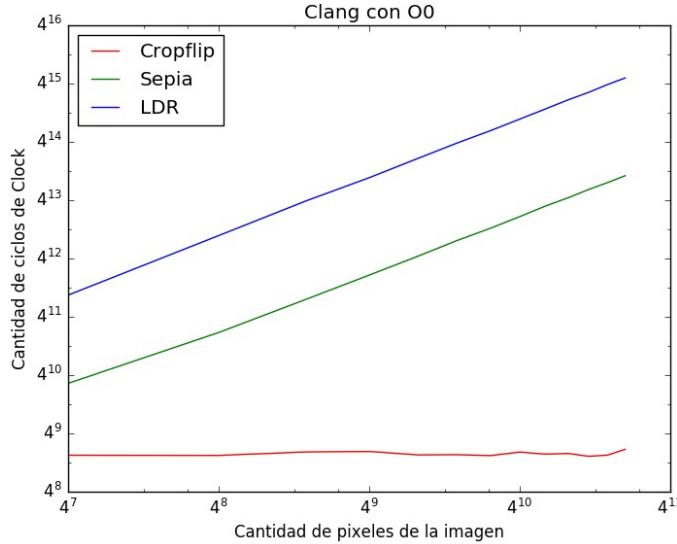


Figura 20: Filtros con Clang -O0

Vemos que en Cropflip gana Clang, pero en Sepia y LDR gana GCC, en sepia es mas notorio mientras que en LDR la diferencia es bastante menor.

Ahora, vamos a repetir el mismo experimento pero variando las flags, esta vez vamos a usar O3 y como hipótesis, esperamos ver un comportamiento similar al visto en O0.

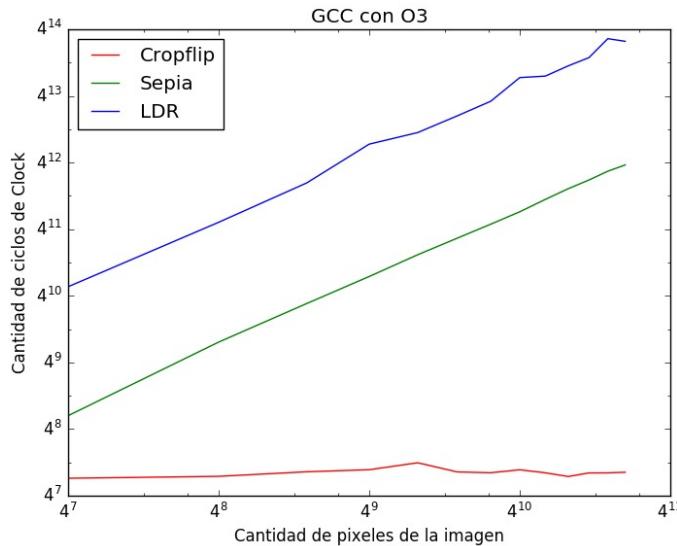


Figura 21: Filtros con GCC -O0

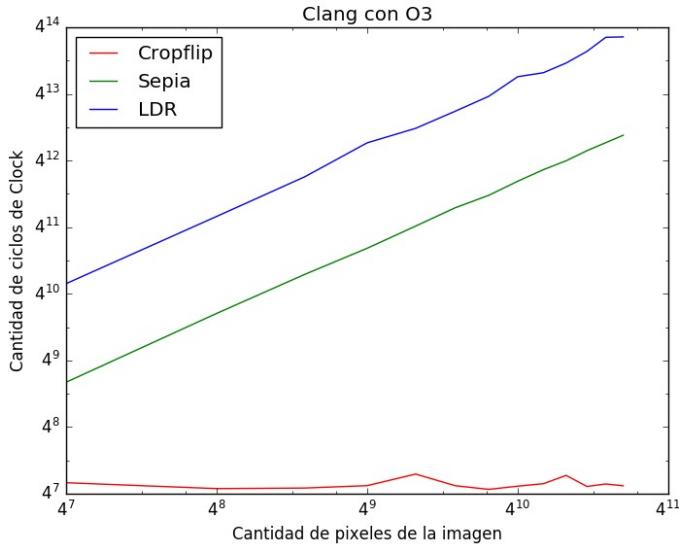


Figura 22: Filtros con Clang -O0

Efectivamente, se da el comportamiento previsto, en Cropflip gana Clang mientras que en los otros gana GCC

3. Conclusiones y trabajo futuro

Como conclusiones generales podemos destacar que los algoritmos implementados en código Assembler con el uso de instrucciones SSE de Intel son más óptimos que las implementaciones de los algoritmos en C (que se compilaron sin ningún tipo de optimización). Esto se debe principalmente a su capacidad de procesar múltiples datos al mismo tiempo, generando un efecto de paralelismo en el procesamiento y reduciendo la cantidad de accesos a memoria. No obstante, al utilizar flags de optimización en la compilación de los algoritmos implementados en C, la situación cambió en algunos experimentos. Para el caso particular del filtro sepia, resultó ligeramente más óptima en términos de tiempo de ejecución la implementación en C, compilada con optimización O3 y para que utilice la tecnología AVX con registros de 256 bits, que la implemtación realizada en Assembler. Esto puede deberse a que al tener registros aún más grandes que los utilizados en Assembler (SSE de 128 bits), el código que generó el compilador permite procesar aún más datos en paralelo. Para el caso de Low Dynamic Range se notó una mejoría significativa usando la misma optimización pero que no alcanzó a igualar o superar al código realizado en Assembler. En el caso de Cropflip, la mejoría no fue significativa. Por último, es importante destacar que el tiempo necesario para implementar un filtro en lenguaje Assembler es superior al del necesario para realizarlo en un lenguaje de un nivel de abstracción un poco más alto como es C. Si bien se observan diferencias significativas en la mayoría de los casos en cuestiones de performance, también conviene tener en cuenta el costo de implementación y analizar en cada caso y contexto de uso si el esfuerzo y tiempo adicional justifican los resultados, ya que como se mencionó antes, se puede obtener un muy buen resultado sólo usando optimizaciones del compilador en C.

Como siguientes pasos a realizar para este trabajo se pueden realizar muchas más implementaciones de los filtros en el lenguaje Assembler para comparar su performance. Por ejemplo, para el caso de LDR, se podría realizar una implementación que además de trabajar con los 25 vecinos de un pixel con registros de 128 bits paralelamente, también se almacenen en registros de 128 bits las sumas parciales de estos 25 vecinos para que no haya que calcularlas todas nuevamente para el pixel próximo. La idea sería que solamente se tenga que computar lo que cambia, y lo que de alguna manera permanezca igual se puede almacenar. Esto reduciría los accesos a memoria y las operaciones a realizar, lo que supondría una mejora en el tiempo de ejecución que llevaría el filtro. Para el caso de sepia se podría probar con una implementación que en vez de realizar una multiplicación por un número decimal, realice una multiplicación por un entero y división por un entero para cada canal. Consideraremos igualmente que esta implementación sería menos óptima en términos de ciclos de clock que la realizada actualmente. Para el caso de Cropflip no hay muchas formas de realizar la copia a memoria de la nueva imagen. Se podría probar con una implementación que recorra la imagen en otro orden o que

la copie a memoria en otro orden, pero esto no supondría una diferencia significativa. Se podría usar instrucciones de la tecnología de AVX de Intel en caso de que el procesador lo admita, tanto para este último filtro como para todos. En el caso de usar la tecnología de AVX, todas las implementaciones deberían tener un tiempo de procesamiento menor que las anteriores, ya que con registros de 256 bits y nuevas instrucciones se pueden procesar aún más datos paralelamente.