

37
2es-



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TECNICAS DE FILTRADO PARA LA
RESTAURACION DE IMAGENES

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de
F I S I C O
p r e s e n t a:

MIGUEL MONTOYA GASCA



México, D. F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

1.- INTRODUCCION

- 1.1 Planteamiento del problema
- 1.2 Revisión bibliográfica
- 3.3 ¿ Que se propone en este trabajo ?

2.- INTERACCION RADIACION-MATERIA

3.- MECANISMOS DE DEGRADACION EN IMÁGENES

- 3.1 Ruido
- 3.2 Atmósfera
- 3.3 Sistema de captura

4.- TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN

- 4.1 Revisión de las técnicas existentes (matemáticas)
- 4.2 Las desarrolladas y aplicadas en el presente trabajo

5.- RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.- CONCLUSIONES

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El interés de los métodos de procesamiento digital de imágenes proviene de dos áreas de aplicación principales: mejoramiento de información pictórica para interpretación humana y procesamiento de los datos de la escena en forma automatizada.

Este interés se remonta a la década de los años 20's cuando imágenes digitizadas de eventos internacionales, como por ejemplo: imágenes de personajes destacados en la política, imágenes de eventos deportivos internacionales, etc. fueron transmitidas por cable submarino entre Nueva York y Londres.

Estas eran recibidas a través de señales eléctricas en un código determinado, luego desplegadas en tonos de gris y finalmente eran publicadas en periódicos o revistas.

Sin embargo ha sido hasta los años 60's, cuando se inicia un desarrollo vertiginoso, tanto en novedosas alternativas en las técnicas de procesamiento digital de imágenes, como en una nueva tecnología de hardware propia para este tipo de procesamiento, además de la gran ayuda que han brindado el perfeccionamiento de aviones que alcanzan gran altura y satélites equipados con instrumental complejo de muy alta resolución capaces de generar imágenes para regiones muy diversas del espectro electromagnético, tales como el visible, el infrarrojo y las microondas.

En julio de 1972, la puesta en órbita del satélite de Recursos de la Tierra ERTS-1 (actualmente conocido como LANDSAT) abrió las puertas de la Percepción Remota a los investigadores de todo el mundo para auxiliar con una nueva metodología, que involucra técnicas de procesamiento digital de imágenes e interpretación analógica, a disciplinas como Geología, Cartografía, Geografía, Hidrología, Oceanografía, Agricultura y uso del suelo (ver Slater, 1979; García Simo, 1982; Richards, 1986).

Hasta la fecha, en esta serie siguen funcionando los LANDSAT 4 y 5, aunados a otros satélites que recientemente han sido lanzados como el SPOT y el ERS-I. En la tabla 1.1 se resumen los sistemas de captura de imágenes multiespectrales y satélites más sobresalientes para la observación de la Tierra.

Paralelo a este auge y no menos vertiginoso, encontramos la era computacional en la tercera y actualmente en la cuarta generación de computadoras digitales, para ofrecer alto grado de velocidad y almacenamiento, requeridos para la implantación práctica de algoritmos de procesamiento digital de imágenes y a un costo relativamente bajo.

En la figura 1.1 se muestra el esquema general del proceso de obtención de una imagen digital multiespectral, aquí se puede apreciar que la información es llevada a través de la radiación que es emitida por la fuente luminosa y reflejada, absorbida y reemitida por los elementos de la escena, para finalmente ser captada por el sensor.

La posible diversidad de frecuencias en el espectro de radiación de una fuente tiene como consecuencia que visualicemos

TABLA 1.1
SISTEMAS DE IMAGENES MULTIESPECTRALES Y
SATELITES PARA LA OBSERVACION DE LA TIERRA

	CARACTERISTICAS
AADS-126B.	<p>Version ampliada del AADS-1260, el cual fue diseñado para usarse como un simulador del Thematic Mapper. El IFOV⁽¹⁾ puede ser seleccionado a 2.5 m⁽²⁾ o 1.25 m con campo de vista de 86 o 43 grados respectivamente. Posee 11 bandas.</p>
AVIRIS.....	<p>Airborne Visible - Infrared Imaging Spectrometer. Espectrometro que tiene un sistema de rastreo mecanico capaz de operar hasta con 224 bandas espectrales en el intervalo de 0.4 a 2.4 μm. Posee un IFOV de 1.0 m, campo de vista de 30 grados, cuantización de 10 bits y un registro de datos a 15 Mb/s.</p>
LANDSAT...	<p>Programa que comprende cinco satélites: El primero lanzado el 23 de Julio de 1972 (entonces llamado "Earth Resources Technology Satellite", ahora LANDSAT-1), que llevaba un sistema multiespectral RBV (Return Beam Vidicon) y un sistema de coleccion de datos (DCS). El LANDSAT-2, lanzado el 22 de Enero de 1975, portaba instrumentos con las mismas características nominales que LANDSAT-1. El LANDSAT-3, lanzado el 5 de Marzo de 1978, contenia un sistema de dos cámaras pancromaticas RBV y un MSS⁽³⁾ con una quinta banda en el infrarrojo termico. Los LANDSAT-1-2-3 fueron insertados dentro de una órbita casi polar, a una altitud nominal de 919 Km. con una inclinación de 99.11 grados, un periodo de 1003.27 minutos y un intervalo de cobertura-repetición de 18 dias. El LANDSAT-4, lanzado en Julio de 1982, contiene un MSS con características similares al MSS-1 y 2. Posee la banda 7 del Mapeador Tematico pero no la cámara RBV o DCS. La órbita circular está a una altura de 705 km, la inclinación es de 98.2 grados y el intervalo de repetición de cobertura es de 16 dias. El LANDSAT-5, idéntico al LANDSAT-4, fue lanzado en Marzo de 1984.</p>
MSS.....	<p>Sistema de Rastreo Multiespectral (Multi-Spectral Scanner) Cinco sistemas de rastreo mecanico han sido orbitados como parte del programa LANDSAT. Sus características son IFOV de 76 m. para los MSS 1-2-3 y 30 m. para MSS</p>

⁽¹⁾ Campo Instantaneo de Vista

⁽²⁾ miliradiones

⁽³⁾ Sistema de Rastreo Multiespectral

	4 y 5, campo de vista de 195 Km. cuantización de bits, relación de datos de 15 Mb/s. Posee 4 bandas espectrales.
SPOT.....	Systeme Probatoire D'Observation De La Terre. Lanzado en 1985 y colocado en una órbita sincronizada al sol, circular de 832 Km de altitud y 98.7 grados de inclinación. La carga consiste de 2 sistemas HRV (ver HRV). Están planeados 2 satélites SPOT más. Una banda de 1.6 μm con un IFOV de 20 m. esta adicionada a los HRV's. La banda 0.61 - 0.68 μm opera en 10 o 20 metros de IFOV.
TM.....	(Thematic Mapper) Rastreador optoelectrónico de siete bandas puesto en órbita por la NASA con los MSS 4 y 5 como parte de los LANDSAT 4 Y 5. Lanzado al espacio en Julio de 1982 y Marzo de 1984 respectivamente. Posee órbita circular sincronizada, tiempo de travesía ecuatorial, periodo de 16 días, IFOV de 30 metros (excepto para la sexta banda, para la cual es de 120 metros), campo de vista de 188 Km. cuantización de 8 bits, relación de datos de 85 Mb/s.
HCM	Mapeador con sensibilidad al calor. Rastreador optoelectrónico de dos bandas usado sobre un U-2 en apoyo al HCMR. El IFOV es de 2.8 m. campo de vista de 90 grados. Bandas Espectrales en los intervalos de 0.51 - 0.89 μm y 10.44 - 12.52 μm .
HCMR.....	Radiómetro mapeador con sensibilidad al calor, rastreador optoelectrónico en dos bandas, lanzado el 26 de Abril de 1978 dentro de una órbita casi circular de 620 Km, sincronizada al Sol con 97.6 grados de inclinación, periodo de 16 días, IFOV de 0.5 m en el visible, 0.6 Km en infrarrojo, ancho de barrido de 716 Km.
RV.....	Alta resolución en el visible a bordo del SPOT. Cada HRV opera en tres bandas espectrales con un IFOV de 20 m y una banda pancromática con un IFOV de 10 m. Cada una cubre 60 Km de barrido con una cuantización de 8 bits. Su espejo apuntando a ± 27 grados puede suministrar repetición de cobertura cada cinco días. La razón de datos es de 48 Mb/s para los sistemas HRV, transmitidos en banda X. Bandas espectrales: 0.50-0.59 μm . 0.61-0.68 μm , 0.79-0.89 μm .
RBV.....	Banda pancromática: 0.51-0.73 μm . El RBV multiespectral tuvo un IFOV de alrededor de 70 m y un ancho de barrido de 185 Km. Bandas espectrales: 0.475-0.575 μm . 0.58-0.68 μm . 0.69-0.83 μm .

PUSHBROOM.

Rastreador aereo de cuatro bandas. El sistema parece ser rotado en el intervalo de ± 26 grados para suministrar una vista estereo lateral. Cada banda usa un arreglo lineal unico de 1728 detectores con una seleccion de lentes de longitudes focales de 55, 32 o 18 mm. El IFOV de 0.24, 0.41 o 0.72 mrad. campo de vista de 22.6, 37.9 o 62.9 grados respectivamente, cuantización de 10 bits.

VISSR.....

Radiometro Spin-Scan en el infrarrojo visible. Rastreador de dos bandas en órbita geostacionaria. Suministra imagenes cada 30 minutos. El sistema esta sobre satelites meteorologicos sincronizados (SMS-1 y 2). IFOV de 0.025×0.021 mrad. campo de vista de 18×20 grados. Bandas espectrales: 0.55-0.75 y 10.5-12.5 μm .

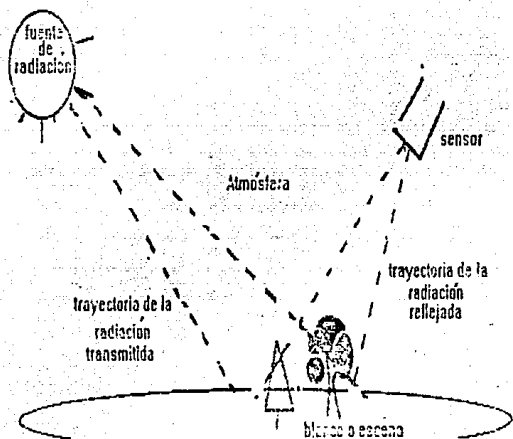


FIG. 1.1 Esquema general del proceso de obtención de una imagen

los diferentes elementos que componen la escena, puesto que cada elemento diferente en la escena tiene la característica de absorber y emitir determinadas longitudes de onda de acuerdo al tamaño de la longitud de onda de la radiación y la estructura micro y macroscópica de tales elementos.

En el capítulo 2 se detalla ampliamente la naturaleza de la radiación y su estructura espectral con las bandas de absorción y emisión en presencia de la atmósfera.

En el capítulo 3 se describen los principales mecanismos de degradación que afectan tanto a imágenes de satélite como a aquellas capturadas por otros medios, como pueden ser: cámaras instaladas en aviones, cámaras digitalizadoras e inclusive cámaras personales (semiprofesionales).

Estos mecanismos tienen que ver necesariamente con los elementos que intervienen en el proceso de captura de la imagen, descritos en la figura 1.1 . Esto significa que cuando la radiación sale de la fuente se encuentra con una serie de obstáculos que están en el medio (degradación atmosférica), al llegar a la escena es reflejada, se vuelve a encontrar con el medio y finalmente es recibida por el sistema de captura, en el cual se encuentran más factores de degradación . Por último se describe el ruido que generalmente se introduce en esta última etapa.

En cada uno de los mecanismos de degradación mencionados existen una amplia variedad de causas que se describirán también en este trabajo.

En el capítulo 4 se encuentran recopiladas las técnicas de restauración (matemáticas) existentes y las que se aplican en el presente trabajo.

En el capítulo 5 se muestran los resultados de las técnicas empleadas así como el análisis de los mismos.

Por último, en el capítulo 6 se dan las conclusiones.

El presente trabajo se avoca al campo de restauración de imágenes, entendiendo por esto al proceso que consiste en compensar las degradaciones introducidas en la imagen por el mecanismo de captación de la misma.

Este trabajo está contemplado también para ampliar la infraestructura de la sección de Percepción Remota en el Área de Procesamiento Digital de Imágenes del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México:

A continuación se describe en forma sucinta el concepto de degradación y sus manifestaciones más importantes.

Un sistema de captura de imágenes puede verse como una caja negra (cuando la función de transferencia es desconocida) que es capaz de interceptar un poco o toda la energía radiante reflejada o emitida por el objeto. El sistema tiene la función de traer a foco las energías interceptadas y formar una imagen, es decir, una representación del objeto original que emitió o reflejó la energía (ver fig. 1.2)

Para simplificar en términos matemáticos la descripción de la formación de una imagen, se requiere asumir invariancia espacial y linealidad en el proceso de formación, bajo tales suposiciones es posible describir a dicho proceso por la siguiente ecuación (Rosenfeld, 1980):

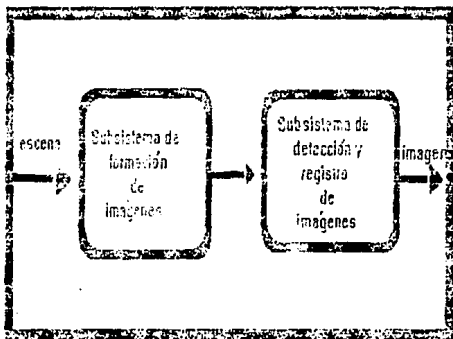


FIG. 1.2A Diagrama de bloques que muestra el proceso de captura de una imagen por medios artificiales

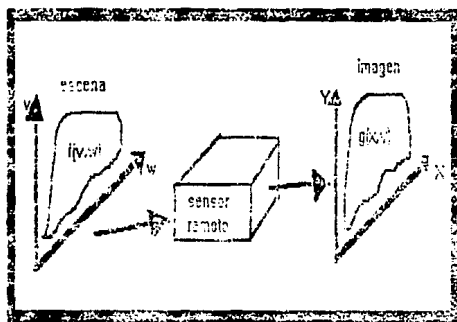


FIG. 1.2B Subsistema de formación de imágenes

$$g(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} h(x-x', y-y') f(x',y') dx' dy'$$

donde la función f representa la distribución de energía bidimensional correspondiente al objeto original. La función g es la representación de f que es creada en el espacio imagen por el proceso de formación de la imagen, a " h " se le conoce como "LA FUNCION DE RESPUESTA AL IMPULSO", "FUNCION DE DISPERSION DE PUNTO" o "FUNCION DE TRANSFERENCIA".

En el caso de captura de imágenes desde satélite la radiación, al salir de la fuente debe atravesar la atmósfera, cuya presencia permanente crea dificultades en la calidad de la percepción y formación de la imagen, esta dificultad se presenta antes y después de que la radiación incide sobre la escena y se debe a los procesos de dispersión, absorción y reemisión (Kondratyev, 1963) de radiación producidos por gases permanentes y partículas en semi-suspensión (aerosoles) en el medio.

La atmósfera, al componerse de moléculas heterogéneas y no tener uniformidad en su distribución espacial provoca diversos grados de degradación en la imagen formada.

La importancia de esta fuente de degradación es que siempre está presente y se manifiesta por tener en la imagen efectos como: "fuera de foco", reducción del contraste aparente y en casos más drásticos (neblina, contaminantes y nubes) ocultamiento parcial o total de parte de la imagen.

Otra fuente de degradación se presenta en la interacción de la radiación con la materia que forma la escena, en la cual se han de presentar procesos de dispersión y absorción, similares al efecto atmosférico, que dependen de la dirección en que la radiación incide sobre los objetos de la escena y la forma y tamaño que presentan estos (ver fig 1.3).

La degradación debida a efectos topográficos se puede ejemplificar a gran escala, con el sombreado que provocan las partes altas (montañas) sobre las partes bajas (valles, laderas, cañones, etc.) en regiones con relieve muy irregular puesto que la radiación es obstaculizada y por consiguiente no se obtiene información de aquellas partes en donde no incide (ver fig 1.4).

Otro factor que provoca alteraciones en la fidelidad de la imagen es el hecho de que la tierra, por su propia naturaleza, emite radiación al poseer elementos radiactivos y una determinada temperatura, aunque en general, la afectación es pequeña.

El sombreado también se presenta con las nubes, ya que la iluminación de fondo producida por la atmósfera, provoca que el sensor capture flujo radiante adicional por encontrarse en la línea que une la escena con el sensor, además de la señal que la misma nube emite.

Finalmente, se presentan diversas degradaciones en las imágenes debidas a los instrumentos, como son:

- Aberraciones cromáticas producidas por imperfecciones en el sistema óptico del detector y manifestadas por distorsión en las imágenes y, en las que son de color, por alteración cromática.

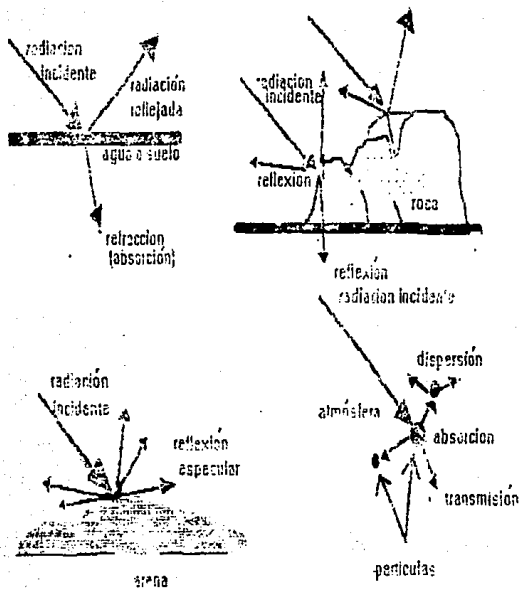


Fig. 1.3 Efectos de dispersión y absorción en la interacción radiación-materia

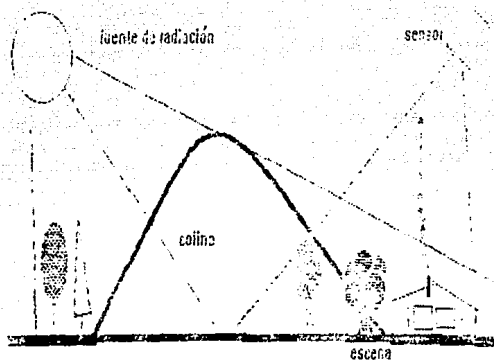


Fig. 1.4 Efectos topográficos en la interacción radiación-materia, como consecuencia se tiene pérdida de información

- Manchas producidas por movimiento relativo entre el detector y la escena, debido a movimientos bruscos del primero, causados por agentes externos o pérdida de control sobre él.

Hay muchas fuentes de degradación en los sistemas de captura de imágenes. Algunos tipos de degradación afectan solamente los niveles de gris de los puntos de la escena (sin introducir mancha espacial), éstas son algunas veces llamadas degradaciones espaciales. Hay otras clases que involucran efectos cromáticos o temporales.

Las degradaciones puntuales y espaciales ocurren en una variedad de aplicaciones, como por ejemplo, en reconocimientos aéreos o Astronomía, en donde las imágenes son degradadas por turbulencia atmosférica, aberraciones del sistema óptico y movimiento relativo entre la cámara y el objeto.

Las micrografías electrónicas son frecuentemente degradadas por la aberración esférica de las lentes electrónicas. Las imágenes de radiografías médicas son de baja resolución y contraste debido a la naturaleza de los sistemas de captura a través de Rayos X.

Los aparatos por sí mismos, están expuestos a fallas mecánicas, y entre las degradaciones que producen se encuentran:

- i) Desafocamientos: muy comunes, originados por fallas en el sistema automático de afocamiento.
- ii) Bandeamientos: que pueden ser sistemáticos, a causa del no funcionamiento o descalibración de alguno de los detectores o por efectos espurios al momento de digitalizar la imagen.
- iii) Ruido Aleatorio: el cual puede ser de muy diversa naturaleza y entre algunas de las causas podemos citar:

desincronización de los aparatos, desgaste, descontrol, falta de mantenimiento en la electrónica de los aparatos, etc.

Todos los efectos a que hemos hecho referencia están presentes en las imágenes, en diverso grado, disminuyendo en consecuencia su calidad.

La calidad de una imagen podemos concebirla (ver Pratt, 1991) de dos formas:

-Fidelidad: caracteriza a la imagen procesada respecto a una imagen estándar.

-Intelegibilidad: habilidad del hombre o máquina para extraer información relevante de una imagen.

Así, con el entendimiento de este concepto, la relevancia de las técnicas de restauración de imágenes se encuentra en facilitarnos la extracción de información y que ésta sea más fiel a la realidad.

Existen diversos métodos (Ekstrom, 1984) de restauración de imágenes, los cuales pueden dividirse en tres clases:

- 1) Métodos de solución que difieren en el trato matemático que se da a la ecuación integral asociada.
- 2) Métodos de solución que difieren en la forma en que son incorporadas diversas suposiciones respecto al sistema de captura de imágenes y
- 3) Métodos de solución que requieren un conocimiento a-priori de la "Función de Respuesta al Impulso", del mecanismo de registro del flujo de energía, de la función de ruido y de la inferencia de estas cantidades a partir de datos fundamentales relacionados con la imagen.

En cuanto a los trabajos realizados hasta la fecha sobre técnicas de restauración encontramos una gran cantidad, destacando aquellas que se basan en principios estadísticos y aquéllas que utilizan alguna transformación matemática como la Transformada de Fourier donde la imagen es tratada en el espacio de frecuencias.

Así, se ha trabajado (Mastin, 1985) el suavizamiento del ruido en imágenes digitales aplicando filtros adaptivos, es decir, filtros en los que existe una ponderación del valor del pixel central de una ventana dada, el cual está determinado en función de los pixeles vecinos. Se han evaluado algunas técnicas de suavizamiento de ruido preservando bordes, en las cuales se han considerado: efectos de interacción, efectos de ruido y efectos de distorsión de bordes, todo lo anterior con un análisis de comparación entre imagen original e imágenes restauradas, previamente degradadas con ruido aleatorio gaussiano (Roland y Chia-Lung, 1982).

En otra clase de técnicas, tenemos aquellas que están basadas en una transformación lineal, en particular aquellas que utilizan la Transformada de Fourier.

Se han obtenido resultados eficientes, aplicando filtraje de Wiener, el cual se detalla ampliamente en el capítulo 4 del presente trabajo, para imágenes degradadas por efectos de desenfocamiento, aproximando la función de respuesta al impulso a una función gaussiana (Berriel, 1983 y Gonzalez, 1983). Otros filtros en esta categoría, los cuales ya son tradicionales por su eficiencia, son el filtraje inverso, el filtraje de mínimos cuadrados y el de mínima entropía (Gonzalez, 1983; Jain, 1989).

Hasta ahora, se han mencionado algunos filtros que se aplican a imágenes con degradaciones comunes, sin embargo existe otro problema de degradación que es tan común o más que los anteriores, esto es, imágenes con nubes, el cual tiene alto grado de dificultad por la naturaleza misma de las nubes que varían enormemente tanto en espesor como en extensión y en forma.

Respecto a este problema, se ha trabajado sobre nubes delgadas, aplicando un modelo de normal truncada, el cual necesita satisfacer algunas condiciones (Vernberg y Diemer, 1982; Lira y Oliver, 1983), estas son:

- 1) Debe existir un número suficiente de mediciones vecindadas donde la radiancia es la misma en ausencia de nubes.
- 2) La presencia de nubes disminuye la radiancia de la superficie terrestre.
- 3) Algunos campos visuales están libres de nubes.
- 4) La diferencia entre radiancias de dos campos visuales libres de nubes es debida solamente al ruido instrumental cuyas distribuciones son asumidas normales con desviación estandar conocida.

Un modelo que ha tenido éxito para corregir efectos de degradación atmosféricos es el Modelo de Difusión aplicado a imágenes multiespectrales (Lira y Oliver, 1983), este describe al proceso de degradación por una ecuación de difusión que da una simple y relativamente buena solución al problema de nubes delgadas.

En el presente trabajo se analizaron e implantaron algunos filtros para las siguientes clases de degradación: bandsamientos, ruido aleatorio de tipo gaussiano y desafocamiento.

Los dos primeros casos se analizaron tanto en el dominio espacial como en el dominio de las frecuencias con el fin de determinar las ventajas de uno y otro, además de hacer un análisis en cada uno de ellos variando los diferentes parámetros involucrados.

Finalmente para el caso de desafocamiento, se aplicó un modelo de difusión, similar al de corrección atmosférica, al considerar el efecto de desafocamiento que se tiene cuando existen nubes delgadas entre el sensor y la escena.. El proceso está determinado por una función gaussiana. Estos filtros son importantes porque tienen aplicación inmediata a imágenes que se procesan para la prospección de recursos naturales o con aquellas que se digitizan en el desarrollo de diversos proyectos.

El método que se sigue en la demostración práctica de los algoritmos computacionales, es aplicar primero el filtro a una imagen muy simple como puede ser la imagen de un cuadro, una barra o un círculo y luego aplicar ese mismo filtro a una imagen un poco más complicada, como es la imagen del planeta Saturno.

CAPÍTULO 2

INTERACCIÓN RADIACIÓN MATERIA PRINCIPIOS FÍSICOS BÁSICOS

A la radiación emitida por un cuerpo como resultado de su temperatura se le llama radiación térmica. Todos los cuerpos emiten tal radiación en su alrededor y la absorben de sus inmediaciones. Si al principio un cuerpo está más caliente que sus inmediaciones, se enfriará, porque su rapidez de emisión de energía excede a la rapidez de absorción. Cuando se alcanza el equilibrio térmico la razón de emisión y la de absorción son iguales.

La materia en un estado condensado (esto es, sólido o líquido) emite un espectro continuo de radiación. Los detalles del espectro dependen sobremanera de la temperatura. A temperatura ambiente la mayoría de los cuerpos son visibles no por la luz que emiten, sino por la que reflejan: si no les llega luz, no podemos verlos. Sin embargo, a temperaturas muy altas, los cuerpos son autoluminosos, y es posible verlos brillar en un cuarto oscuro (por ejemplo carbones encendidos), pero aún a temperaturas tan altas como varios miles de grados Kelvin, bastante más del 90% de la radiación térmica emitida nos es invisible, porque está en la parte infrarroja del espectro electromagnético. Así pues los cuerpos autoluminosos han de estar relativamente calientes.

Existe una clase de cuerpos calientes llamados "cuerpos negros", que emiten radiación térmica con el mismo espectro que al que reciben a una temperatura dada, independientemente de los detalles de su composición.

La distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro se describe mediante la cantidad $R(\nu)$, llamada la radiancia espectral, la cual se define de tal manera que la cantidad $R(\nu)d\nu$ es la rapidez con que una superficie radia energía por unidad de área a temperatura absoluta T , para frecuencias en el intervalo ν a $\nu+d\nu$. En la figura 2.1 se muestra la dependencia observada experimentalmente de R tanto en función de ν como de λ a diferentes temperaturas.

La dependencia exacta de la radiancia en función de la temperatura está dada por la Ley de Stefan (Eiichi, Slater, 1980):

$$R_T = \sigma T^4 \quad (2.1)$$

en la cual

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$$

es una constante universal llamada constante de Stefan-Boltzman.

Planck postuló que los osciladores armónicos simples pueden tener sólo energías totales E , las cuales toman valores discretos dados por

$$E = h\nu \quad (2.2)$$

en donde h es una constante universal y ν la frecuencia de oscilación.

La suposición de Planck se basa en que las ondas electromagnéticas de la cavidad de un cuerpo negro se originan a partir de la radiación expedida por los electrones que están agitados térmicamente y oscilan en las paredes de la cavidad. Clásicamente se pensaba que los osciladores electrónicos de las paredes de la cavidad radiaban su energía continuamente, mientras su movimiento se apaciguaba gradualmente. En cambio, Planck supuso

PLANCK: LEY DE LA DENSIDAD DE ENERGÍA EN CUERPO NEGRO A DIFERENTES TEMPERATURAS.

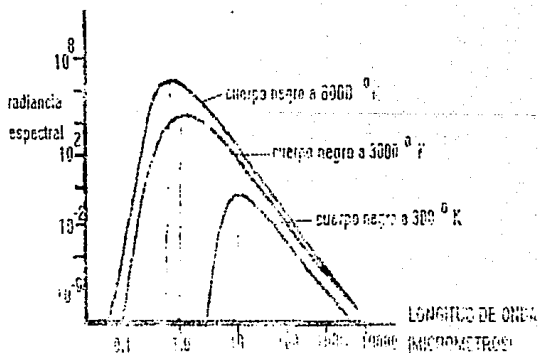
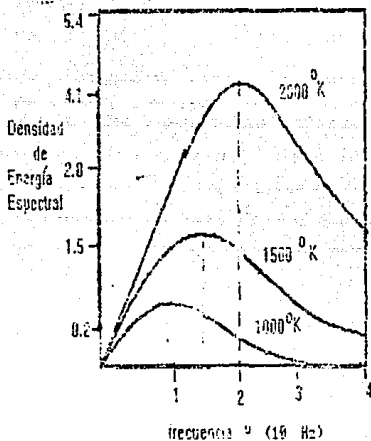


FIG 21 ESPECTRO DE ENERGÍA DE UN CUERPO NEGRO RESPECTO A LA FRECUENCIA Y A LA LONGITUD DE ONDA PARA DIFERENTES TEMPERATURAS.

que un oscilador emite su radiación en forma de paquetes. Así la energía de un oscilador no se apaga en forma continua, sino en forma discreta. Por lo tanto, los valores permitidos de energía en un oscilador deben ser discretos y mientras intercambia energía con la radiación de cavidad emite ó absorbe energía radiante únicamente en cantidades discretas, ya que las energías discretas que un oscilador puede emitir o absorber son directamente proporcionales a su frecuencia, los osciladores de baja frecuencia pueden absorber o emitir energía en paquetes pequeños, mientras los de alta frecuencia lo hacen únicamente en paquetes grandes.

A baja temperatura, las paredes radian principalmente en la región de onda larga y muy poco en la ultravioleta. Al elevarse la temperatura de la pared, hay suficiente energía térmica para activar un número mayor de osciladores de alta frecuencia, y la radiación resultante modifica su carácter hacia frecuencias más altas, es decir, hacia el ultravioleta.

El modelo matemático que describe la distribución espectral de la radiación emitida desde un radiador perfecto o cuerpo negro se conoce como la "Ley de Planck", la cual se obtiene a partir del principio de la cuantización de la energía.

La expresión de esta ley en función de la frecuencia es:

$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu \quad (2.3)$$

mientras que en términos de la longitud de onda⁽¹⁾ es:

$$\rho(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2.4)$$

¹ $\nu = c/\lambda$

donde la intensidad de radiación ρ está dada en $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$ mientras que las constantes en la ecuación (2.4) están definidas por:

h = constante de Planck = $6.6256 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$

c = velocidad de la luz = $2.997325 \times 10^8 \text{ m/s}$

k = constante de Boltzman = $1.38 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} / ^\circ\text{K}$

T = temperatura absoluta en grados Kelvin ($^\circ\text{K}$)

λ = longitud de onda en metros.

Una forma útil de la ecuación (2.4) para fines de cálculo es:

$$\rho = 3.74151 \times 10^8 / \lambda^5 [\exp(1.43879 \times 10^4 / T) - 1]$$

Las curvas del espectro de radiación del cuerpo negro correspondientes a varias temperaturas se muestran en la figura 2.1. En esta figura podemos observar que la frecuencia para el máximo de densidad de radiación se va recorriendo hacia las altas frecuencias.

El sol es la fuente primaria de radiación empleada en Percepción Remota, desde el punto de vista "nearwe", en la cual es necesario estudiar las variaciones del flujo radiante provocadas por los procesos físicos de dispersión, reflexión y absorción llevados a cabo en la atmósfera y en la superficie de la Tierra.

El flujo de radiación que sale del Sol, es alterado por las enormes variaciones de temperatura que ocurren a lo largo de su radio y por la opacidad de ciertas regiones de la atmósfera solar a diferentes longitudes de onda. En otras palabras, la temperatura efectiva del Sol es dependiente de la longitud de onda. La temperatura en el centro del Sol es de alrededor de $1.5 \times 10^7 \text{ } ^\circ\text{K}$ y esta cae a $6000 \text{ } ^\circ\text{K}$ en la fotosfera y a $4300 \text{ } ^\circ\text{K}$ justo debajo de la frontera entre la fotosfera y la cromosfera. La temperatura entonces se eleva a través de la cromosfera hasta con máximos de

1.5×10^6 °K en la parte baja de la corona. A longitudes de onda de milímetros, el flujo de radiación solar se aproxima al de un cuerpo negro a 6000 °K.

Como nuestro interés se encuentra en el estudio de imágenes en la región óptica del espectro electromagnético, en la figura 2.2 se muestran curvas típicas de irradiancia solar:

- a) Exterior a la atmósfera de la Tierra.
- b) Al nivel del mar con el Sol en el zenith y
- c) Equivalente a un cuerpo negro a 5900 °K fuera de la atmósfera.

La absorción es una transformación termodinámicamente irreversible de energía radiante en calor. En el espectro visible y más allá de $0.8 \mu\text{m}$ la absorción en una atmósfera clara es despreciable. En una atmósfera brumosa o sucia (polvo o contaminantes), sin embargo, la absorción debe ser tomada en cuenta para cálculos sobre transferencia de radiación.

La absorción debida al ozono es muy fuerte abajo de aproximadamente los $0.29 \mu\text{m}$ y tanto el vapor de agua como el dióxido de carbono dan lugar a la elevación del número de bandas de absorción en el infrarrojo.

Cuando un rayo o flujo de luz incide con un ángulo de inclinación no normal respecto a la superficie incidente en una interfase aire-liquido, es desviado o refractado, hacia la normal a la superficie.

La razón es que éste liquido es de densidad mayor, y una medida para valorar su magnitud es el índice de refracción. Este índice es el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio liquido c' :

$$n = c/c' \quad (2.5)$$

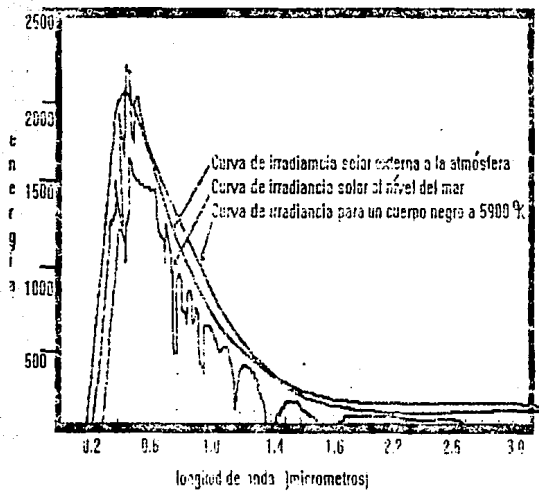


FIG. 2.2 Curvas de irradiancia solar

El grado de la refracción está dado por la "Ley de Snell", es decir,

$$n \sin \phi = n' \sin \phi' \quad (2.5)$$

donde ϕ es el ángulo del rayo incidente respecto a la superficie

ϕ' es el ángulo del rayo reflejado respecto a la superficie

n es el índice de refracción del aire o vacío y

n' es el índice de refracción de la superficie.

en el caso de una superficie reflectora, el índice se conserva, y:

$$\phi = \phi' \quad (2.7)$$

El rayo incidente, el normal a la superficie, el rayo reflejado y el refractado se encuentran en el mismo plano, lo cual indica que el medio es isotrópico.

Casi todo el mundo que nos rodea y la energía que de él proviene, está más allá del alcance de los sensores con los que hemos nacido. Nuestros ojos responden a la luz en una porción del espectro electromagnético comprendido entre los 4000 y los 7000 angstroms de longitud de onda. nuestros oídos responden o perciben el sonido a frecuencias entre 16000 y 20000 ciclos por segundo y nuestra piel a relativamente grandes cambios en la temperatura, el resto de la energía va hacia lugares del mundo y del Universo lejos de nuestro alcance.

El espectro electromagnético se extiende (ver tabla 2.1) desde los rayos cósmicos en el extremo de las longitudes de onda corta hasta las ondas de radio de baja frecuencia en el extremo de las longitudes de onda larga.

ESPECTRO ELECTROMAGNETICO	
REGION	INTERVALO
RAYOS GAMMA	$\dots - 10^{-5} \mu\text{m}$
RAYOS X	$10^{-5} - 10^{-9} \mu\text{m}$
ULTRAVIOLETA	0.3 - 0.4 μm
ÓPTICA	0.3 - 15.0 μm
VISIBLE	0.4 - 0.7 μm
INFRARROJO	
CERCANO	0.7 - 1.3 μm
MEDIO	1.3 - 3.0 μm
LEJANO	3.0 - 14.0 μm
MICROONDAS	1mm - 20 cm
RÁDAR	Línea de H de 21 cm
RADIO Y TV	1m -
REFLECTIVA	0.3 - 3.0 μm
EMISIVA	3.0 - 14.0 μm
SENSORES FOTOGRÁFICOS	0.3 - 0.9 μm
RASTREADORES	
MULTIESPECTRALES	0.3 - 15.0 μm

TABLA 2.1 ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Al principio, los sistemas de percepción remota registraban emanaciones de energía desde la superficie de la Tierra en cualquier intervalo sensible de longitudes de onda. Sin embargo, consideraciones tecnológicas, la opacidad selectiva de la atmósfera terrestre, dispersión por partículas atmosféricas y el significado de los datos aportados, excluyen determinadas longitudes de onda. Los principales intervalos empleados para percibir recursos naturales está entre 0.4 y 12 μm . (intervalo del visible/infrarrojo).

En la región de las microondas es común emplear frecuencias en lugar de longitudes de onda para describir intervalos de importancia. Así, el intervalo de microondas de 30 a 300 mm corresponde a frecuencias entre un Ghz y 10 Ghz. En Percepción Remota el intervalo de frecuencias empleado está entre 20Ghz y 60 Ghz.

El significado de estos intervalos está en el mecanismo de interacción entre la radiación electromagnética y los materiales a investigar.

En el infrarrojo y visible la energía reflejada medida por un sensor depende de propiedades tales como la pigmentación, contenido de humedad, estructura celular de la vegetación, contenido de minerales, humedad de suelos y nivel de sedimentación de agua.

En el extremo térmico del intervalo infrarrojo, la capacidad de calor y otras propiedades térmicas de la superficie y subsuperficie controlan la intensidad de radiación detectada.

En el intervalo de las microondas, la magnitud de la señal reflejada esta determinada por: el uso de sistemas de captura de imágenes con sistemas activos basados en técnicas de radar, la

rugosidad de la clase de cobertura que es detectada, sus propiedades electricas expresada en terminos de permitividad (la cual es fuertemente influenciada por el contenido de humedad), la pendiente del terreno y la longitud de onda.

En el intervalo de 20 GHz a 50 GHz el oxigeno atmosferico y el vapor de agua tienen un importante efecto sobre la transmision de radiacion y pueden medirse en ese intervalo. De tal forma que cada intervalo de longitud de onda tiene sus propias intensidades en terminos de la informacion que puede contribuir al proceso de la captacion de imagenes. En consecuencia encontramos sistemas disponibles que son optimizados para operar en intervalos espectrales particulares los cuales suministran datos que complementan los de otros sensores.

La fig 2.3 muestra como los tres materiales dominantes de la superficie de la Tierra: suelo, vegetacion y agua reflejan la energia del Sol en el intervalo de longitudes de onda en el visible e infrarrojo.

La interaccion radiacion-materia, cuyo analisis detallado se dio anteriormente, esta afectada por el ambiente o medio en que se lleva a cabo el proceso de la Percepcion Remota. En los diagramas de la figura 2.4 se resumen los principales esquemas de este tipo de interaccion que son de importancia para el estudio desarrollado en este trabajo y cuyas consecuencias son abordadas en el mismo.

En primer lugar tenemos el esquema 2.4.1 que muestra la interaccion radiacion-materia cuando el sensor se encuentra en movimiento relativo respecto a la escera. En este caso, la distribucion de la energia es diferente con respecto al caso en que no existe movimiento relativo, es decir, la imagen va

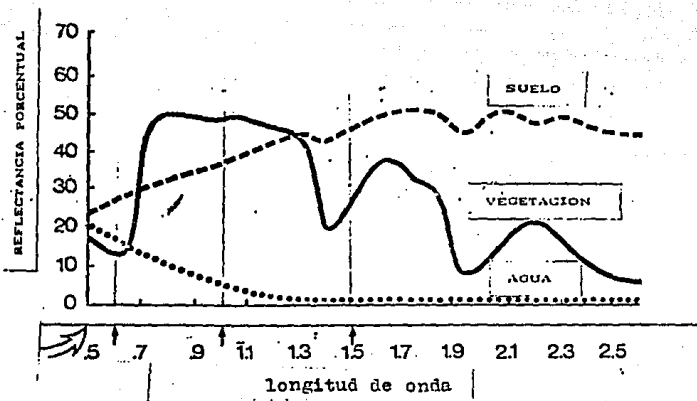


Fig. 2.3 Reflectancia de los tres materiales dominantes de la superficie de la tierra: suelo, vegetación y agua

acompañada de mancha en la dirección del movimiento relativo, se pierde nitidez y al aumentar el área de la imagen, esta se percibe difusa.

Por ejemplo, supóngase que la escena está fija respecto al sensor y llegan 10 fotones a una determinada área de la imagen (por ejemplo un pixel). entonces cuando existe movimiento relativo, el número de fotones en la misma área se reducirá, supóngase que a tres, por lo que los siete restantes quedan distribuidos en la dirección del movimiento dando poca nitidez a la imagen, además de provocar una superposición de información que la información se salga de la placa filmica.

Desde luego, el camino a seguir para atacar esta anomalía es a través de la modelación de la función de transferencia en términos de la velocidad lineal del movimiento.

En segundo lugar (fig 2.4.b) tenemos el proceso de absorción de la radiación a través del medio u objeto reflector, este proceso fué analizado al estudiar la ley de la refracción de Snell y se comenta en el contexto de la interacción radiación-atmósfera del capítulo 3.

En el tercer esquema, 2.4.c, se muestra la influencia o interacción que ejercen sistemas intrínsecos al sistema de estudio, tal es el caso de imágenes tomadas a tejidos, membranas celulares vivas, estructura ósea, tumores cancerígenos, etc. En donde la imagen está inmersa en un medio acuoso y la radiación debe atravesar algunas paredes que envuelven y cubren la parte de interés. lo cual de alguna manera influye en la información que de la escena se pueda obtener, este hecho es similar aunque no en su naturaleza, al efecto de las nubes en una imagen de la superficie de la Tierra.

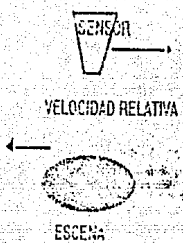


FIG. 2.4.a DEGRADACIÓN POR MOVIMIENTO RELATIVO

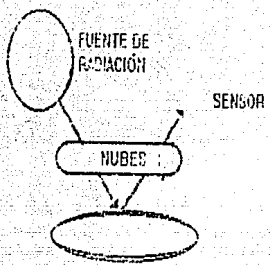


FIG. 2.4.b DEGRADACIÓN POR INTERFERENCIA DE NUBES

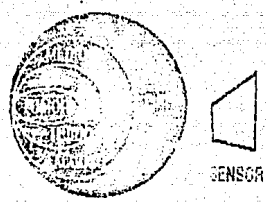


FIG. 2.4.c DEGRADACIÓN POR ANIDACIÓN DE SISTEMAS

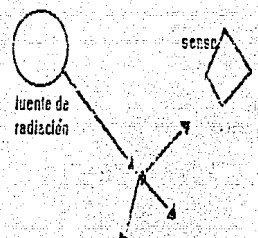


FIG. 2.4.d DEGRADACIÓN POR DISPERSIÓN

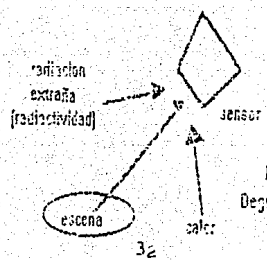


Fig. 2.4.e Degradación por ruido

Otro ejemplo es el de las placas de Rayos X (sobre el sistema óseo), las cuales como hemos visto resultan manchadas ó borrosas debido a la interacción de la radiación con los sistemas que rodean a la región de interés como es la piel, tejido muscular, líquidos y órganos, entre otros.

Estos son algunos ejemplos, entre otros. Aunque a decir verdad: ¿ Como podemos tener un sistema aislado ? Desde luego, la pregunta no es difícil de contestar porque no es fácil lograr un sistema en esta condición, sin embargo se deben tomar en cuenta los efectos y en la medida de lo posible cuantificarlos y controlarlos.

En el cuarto esquema, 2.4.d. tenemos el proceso de dispersión de la radiación en la interacción de ésta con las partículas de la atmosfera (partículas, aerosoles, partículas en semi-suspensión). Este punto se analiza con mas detalle en el capítulo 3

Finalmente el quinto esquema, figura 2.4.e, se refiere al registro de ruido en la imagen captada; el ruido puede ser de tipo aditivo o multiplicativo, el cual de cualquier manera es abordado de la misma forma, es decir, detectada la función que describe el ruido simplemente se resta de la función registrada por el sensor remoto para el caso de ruido aditivo a priori, mientras que para ruido multiplicativo se aplica previamente una transformación logarítmica.

La naturaleza del ruido es muy variada, una fuente común son los instrumentos electrónicos con los que es registrada la imagen. En la actualidad la entrada al estado sólido de superconductores hace que los instrumentos sean mas precisos y más libres de ruido, sin embargo este también puede provenir de eventos azarosos en el momento de registro de la imagen, tales como polvo, interferencia

por radiación ajena a la reflejada por la escena, mal funcionamiento del sensor, entre otras circunstancias presentes.

Ahora bien, cuando se tiene ruido azaroso y se desconoce la naturaleza de este, el investigador en el tratamiento de restauraciones requiere modelar la función que caracteriza el ruido utilizando sus propiedades estadísticas a partir de la imagen degradada.

En general, es necesario suponer cierto comportamiento para el ruido, como por ejemplo que su distribución sea gaussiana y de media cero, lo que se conoce como "ruido blanco".

CAPÍTULO 3

MECANISMOS DE DEGRADACIÓN EN IMÁGENES

El planteamiento preciso del problema de la restauración de imágenes requiere de una discusión de los conceptos básicos de creación de la imagen y la descripción de la formación de la imagen por medio de conceptos como sistemas lineales y transformada de Fourier.

La superficie de un objeto está definida como un ente bidimensional que emite o refleja energía radiante. La energía es de una variedad de formas, por ejemplo: energía electromagnética, energía acústica o energía corpuscular.

La descripción del proceso de formación de la imagen en términos matemáticos simples requiere que se asuma invariancia y linealidad espacial, es decir, la imagen formada de dos objetos que están presentes simultáneamente en el espacio-objeto es igual a la suma de las imágenes formadas cuando cada uno de los objetos está presente en el espacio-objeto y no cambian con la posición. Bajo tales suposiciones, es posible describir la formación de las imágenes por medio de la siguiente ecuación:

$$g(x, y) = \iint h(x-x_1, y-y_1) f(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (3.1)$$

Las cantidades en esta ecuación tienen el siguiente significado:

La función " $f(x_1, y_1)$ " representa la distribución bidimensional de energía correspondiente al objeto original.

La función " $g(x,y)$ " es la representación de "F" que es creada en espacio-imagen por medio del proceso de formación de la imagen.

La función " $h(x_1, y_1)$ " es más importante, debido a que engloba todo el comportamiento importante del sistema de formación de la imagen, es conocida como *point spread function* (PSF), la cual se podría traducir como *función de dispersión puntual*. Es completamente análoga a la función de respuesta al impulso usada en el análisis de sistemas de tiempo lineales, pero extendida a dos dimensiones para sistemas espaciales lineales. También se le conoce como *función de respuesta al impulso* o *función de transferencia*.

Es importante reconocer que, debido a que la formación de la imagen es un proceso de captura y afocamiento de energía radiante, la imagen $g(x,y)$ varía como respuesta a las fluctuaciones de energía radiada por el objeto. Así, dentro de la ecuación 3.1 debemos de introducir una función que tome en cuenta la sensibilidad y el registro del flujo de energía.

3.1) RUIDO PRESENTE EN UNA IMAGEN

El mecanismo de registro de imágenes es siempre imperfecto, las distorsiones existentes pueden ser predecibles o aleatorias. Las primeras son consideradas dentro de la función de transferencia, mientras las segundas se incluyen por medio de una componente de ruido de la siguiente manera:

$$g(x,y) = S \left[\iint h(x-x', y-y') f(x', y') dx' dy' + n(x,y) \right] \quad (3.2)$$

en donde:

$f(x', y')$ representa la distribución bidimensional de energía correspondiente al objeto original.

$g(x,y)$ es la representación de "f" que es creada en espacio-imagen por medio del proceso de formación de la imagen

$h(x-x',y-y')$ es la función de respuesta al impulso

$n(x,y)$ es la función que engloba al ruido y

S es la función que considera la sensibilidad y el registro del flujo de energía.

El ruido o componente aleatoria $n(x,y)$ en esta ecuación es mas general que aquella debida al proceso de registro de la imagen.

Las imágenes de por sí contienen una componente aleatoria ya que a partir de la mecánica cuántica se ha demostrado que la emisión de energía se da en paquetes llamados fotones, la captación y registro de estos varía de instante a instante en una área determinada fija.

Esta componente es indeoendiente de cualquier aleatoriedad introducida por perceocion y registro de la imagen. Por tanto, debido a esta componente, existen distorsiones en la imagen, las cuales generalmente pasan des-percebidas, tal vez sean pequeñas pero existen.

Las siguientes son algunas manifestaciones de ruido aleatorio

a) Cuando una imagen se cuantiza, puede ser degradada por ruido aleatorio o contornos falsos dependientes de la señal, este efecto significa perder resolución en cuanto al tamaño del pixel. Se pierde suavidad entre pixeis vecinos, generando los efectos antes descritos (ver Pratt, 1980).

b) Cuando se emplea una fuente de luz coherente, como en los sistemas de radar, la imagen puede degradarse por medio de un

efecto (ver Lin y Nawas, 1981) provocado por interferencia constructiva y destructiva de la radiación coherente, e inclusive por la existencia de una fuente radiactiva en la escena misma, este efecto se manifiesta puntual y al azar.

c) Una imagen registrada sobre una placa fotografica se degrada por ruido (ver Huang, 1966 y Andrews, 1977). Esta degradación depende del tamaño de las sales de nitrato de plata, cuya fotoionización esta en función del tiempo de exposición

Los efectos descritos en los incisos (b) y (c) se pueden modelar como casos de ruido multiplicativo.

d) Cuando una imagen se codifica y se transmite sobre un canal con ruido o es degradada por ruido del sensor del tipo electrónico, como en la cámara de TV , aparece otra clase de degradación

e) Una imagen se puede degradar por manchas debido al desafocamiento de las lentes, al movimiento relativo sensor/escena o a la turbulencia de la atmósfera.

3.2 INTERFERENCIA ATMOSFERICA

Los procesos que dominan la interacción entre la radiación y la atmósfera son la dispersión y la absorción, los cuales se discutieron en el capítulo anterior.

La absorción es el proceso termodinámico de transferencia de energía radiante en calor. En el espectro visible y hasta $0.6 \mu\text{m}$ la absorción en una atmósfera clara es despreciable. La absorción debida al ozono es muy fuerte abajo de $0.29 \mu\text{m}$ mientras el vapor de agua y el dióxido de carbono provocan bandas de absorción en el infrarrojo.

El proceso de dispersión (Kondratyev, 1969) depende de la distribución en tamaño de los elementos dispersivos, su composición, concentración y la longitud de onda o distribución de longitudes de onda del flujo radiante incidente sobre ellos.

Para procesos de dispersión se hacen las siguientes suposiciones:

- 1) Los elementos dispersores están distribuidos aleatoriamente en el medio dispersor.
- 2) Los elementos dispersores están lo suficientemente alejados unos de otros, para que la acción dispersora sea independiente de la de sus vecinos.
- 3) Los elementos ni son metálicos ni son absorbentes.
- 4) La forma y anisotropía de los elementos se ignora.

En general, el modelo matemático del proceso de dispersión es el siguiente:

$$\beta_{\phi\lambda} = \frac{2\pi^2}{H\lambda^4} [n(\lambda) - 1]^2 (1 + \cos^2 \phi) \quad (3.3)$$

donde H es el número de moléculas por unidad de volumen en la atmósfera (la figura 3.1 muestra la distribución de H con la altitud para una atmósfera normal clara).

$n(\lambda)$ es el índice de refracción que depende espectralmente de las moléculas.

ϕ es el ángulo entre el flujo incidente y el dispersado.

λ es la longitud de onda del flujo incidente.

Si I_λ es la intensidad espectral del flujo incidente no polarizado, entonces el flujo dispersado por unidad de volumen $I_{\phi\lambda}$ está dado por :

$$I_{\phi\lambda} = \beta_{\phi\lambda} I_\lambda \quad (3.4)$$

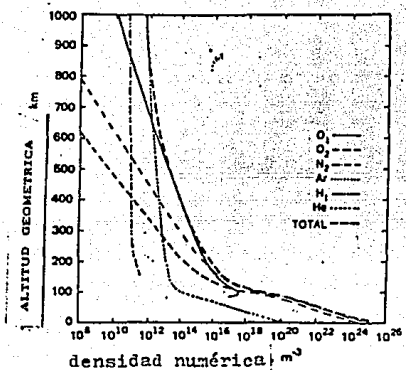


Fig. 3.1 Densidad Numerica de algunos elementos y densidad numerica total como funcion de la altitud geométrica.

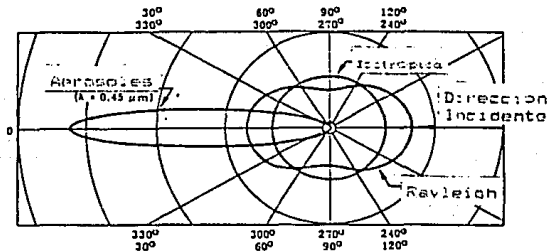


Fig. 3.2 Dependencia angular de las funciones de fase para dispersion simple, en cualquier plano azimutal. Las funciones isotropica y de Rayleigh se multiplicaron por diez.

Notese que las ecuaciones 3.3 y 3.4 se refieren a un flujo dispersado que es inversamente proporcional al numero de moleculas por unidad de volumen y a la cuarta potencia de la longitud de onda del flujo incidente.

La figura 3.2 muestra la distribucion de dispersion respecto al angulo de fase en un plano azimutal.

En la realidad, la dispersion atmosferica es un proceso multiple, es decir, el flujo de radiacion puede ser dispersado en repetidas ocasiones e inclusive en el caso de una atmosfera clara la atmosfera no se comporta como una atmosfera de Rayleigh. La figura 3.3 muestra la probabilidad de dispersion multiple en la direccion frontal como funcion del grosor optico, indica que para un grosor optico unitario existe una probabilidad significativa de dispersion triple en la direccion frontal.

Se puede representar el tamaño del elemento dispersor q por:

$$q = 2\pi r / \lambda \quad (3.5)$$

donde r es el radio de los elementos dispersores y λ es la longitud de onda del flujo radiante. Esta es una ecuación util debido a que permite la separación conveniente de los diferentes tipos de dispersion.

Cuando $q < 1$ Dispersion de Rayleigh
Cuando $1 < q < 2$ Estado transicional de Rayleigh a Mie
(Kondertsev, 1963).

Por otro lado, la dispersion atmosferica es tan importante que nos permite explicar porqué el cielo se ve azul o rojo al salir u ocultarse el sol.

La dispersion causa que la atmosfera tenga una radiación propia.

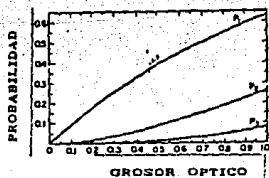


Fig. 3.3 Probabilidad de que ocurra una dispersión simple (P_1), doble (P_2) y triple (P_3) en función del espesor óptico.

La cantidad de radiancia atmosférica en los datos obtenidos por Percepción Remota es función de muchas variables, entre ellas:

- Altitud del sensor
- Condiciones de bruma atmosférica
- Ángulo zenith solar
- Intervalo de sensibilidad espectral del sensor
- Ángulo de vista del nadir y azimuth con respecto al sol
- Polarización

ANGULO ZENITH SOLAR

El ángulo zenith solar y la altitud solar (ángulo de elevación solar), como se definen en la figura 3.4 son ángulos complementarios que describen la posición del Sol en relación al zenith y al plano ortogonal del zenith, respectivamente.

Las mediciones de luminiscencia óptica mediante fotografía a gran altura se muestran en la figura 3.5, e indican que cuando el ángulo zenith solar aumenta desde 0° (el sol está sobre nuestra cabeza), la luminiscencia atmosférica se incrementa a un volumen de dispersión efectiva más grande causada por la trayectoria más larga del flujo solar a través de la atmósfera.

La máxima luminosidad (dos veces la de 0°) se alcanza a un ángulo zenith solar de 60° a 70° .

RANGO DE SENSIBILIDAD ESPECTRAL

El rango de sensibilidad espectral del sistema sensorial es importante debido a que la longitud de onda es dependiente de la dispersión, lo cual se muestra en la figura 3.6. Por esta razón,

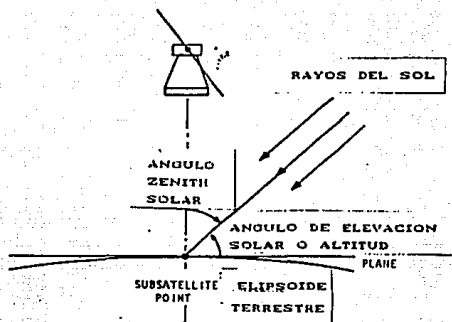


Fig. 3.4 Definición de los ángulos de elevación y zenith solar.

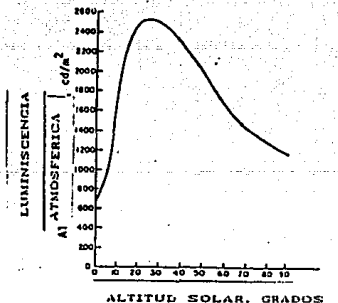


Fig. 3.5 Luminiscencia atmosférica a través de fotografía desde una gran altura en función del ángulo de altitud solar.

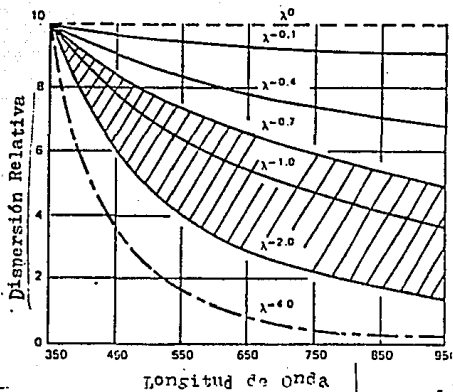


Fig. 3.6 Dispersión Relativa en función de la longitud de onda para diversas magnitudes de la bruma atmosférica:
 ----- bruma saturada (dispersión independiente de la longitud de onda)
 ----- bruma intermedia
 - - - - - bruma mínima (atmósfera de Rayleigh)

los filtros, se usan comúnmente en la fotografía aérea, y es bien conocido que a través de trayectorias largas, el uso de fotografía infrarroja en el intervalo espectral de 0.7 a 0.9 μm suministra una imagen de mucho mayor contraste que una obtenida en luz visible.

La figura 3.7 muestra los resultados de la variación de dos filtros (rojo y verde) respecto a la altitud.

ANGULO DE VISTA DEL NADIR

La trayectoria de la luminiscencia atmosférica puede determinarse usando la siguiente relación debido a Duntley et al. (1957).

$$L_p(z, \omega, \phi) = L(z, \omega, \phi) - L_o(z, \omega, \phi) \tau(z, \omega) \quad (3.6)$$

Esta ecuación simplemente establece que la trayectoria de la radiancia L_p es la diferencia entre la luminosidad total o aparente L y la luminosidad del objeto-tierra L_o a medida que se reduce por la transmitividad atmosférica t , donde:

z = altitud,

ϕ = ángulo de vista del nadir y

ϕ' = ángulo azimutal

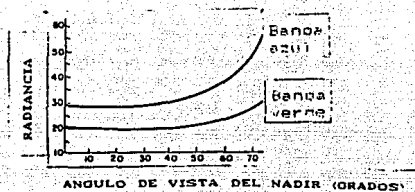


Fig. 3.7 Resultados de la variación de dos filtros rojo y verde con respecto a la altitud

POLARIZACION

Existe muy poco trabajo acerca de la polarización producida por dispersión atmosférica, en 1966 Coulson (Slater, 1980) predijo la polarización en términos de la transmitancia de contraste, la cual se define como:

$$Y = C_o / C_g \quad (3.7)$$

donde C_o es el contraste diferencial en el observador, y equivale a:

$$C_o = \frac{(L_T - L_\beta) \tau}{L_\beta \tau + L_p} \quad (3.8)$$

donde:

L_T = radiancia del objeto

L_β = radiancia del fondo

L_p = radiancia de la trayectoria

τ = transmisividad atmosférica

C_g = Contraste diferencial en tierra, es decir:

$$C_g = (L_T - L_\beta) / L_\beta \quad (3.9)$$

por lo tanto:

$$Y = C_o / C_g = (1 + L_p/L_\beta \tau)^{-1} \quad (3.10)$$

Para mejorar la transmisividad de contraste se pueden emplear filtros polarizadores, pero no resultan convenientes en muchos

casos. ya que con el contraste que se logra también va junto una componente de absorción que disminuye la calidad de la imagen.

REDUCCION DE CONTRASTE

Frecuentemente el contraste de una imagen es el factor que determina el que algunas de las estructuras de la misma puedan identificarse a través de cierta distribución de la radiancia del objeto.

El contraste se expresa en una variedad de formas, las cuales definiremos en términos de irradiancia máxima y mínima:

Relación de contraste:

$$C_R = E_{\max} / E_{\min}$$

Contraste diferencial:

$$C_D = (E_{\max} - E_{\min}) / E_{\min}$$

Contraste logarítmico:

$$C_L = \log_{10} E_{\max} / E_{\min}$$

Modulación:

$$M = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min})$$

Como se ha mencionado, el efecto de reducción de contraste por la atmosfera es debida a la dispersión, la cual ocurre más en el visible que en cualquier otro rango.

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN

La restauración de imágenes es un tema que ha tenido una investigación muy intensa en los últimos 20 años.

Un criterio importante que se debe aplicar en cualquier técnica de restauración es que haya sido probada en una variedad de situaciones.

La restauración de imágenes se considera un proceso que intenta compensar las degradaciones en la imagen producidas por el mecanismo de captación y registro de la misma.

En la tabla 4-1 se muestra una clasificación de los efectos de las degradaciones que aparecen a nuestra vista en las imágenes.

En la tabla 4-2, se muestra una clasificación de algunos filtros digitales para suavizamiento o reducción de ruido en imágenes.

TABLA 4.1
 CLASIFICACION DE LOS DIFERENTES
 TIPOS DE DEGRADACION

FUENTES DE DEGRADACION EN IMAGENES		CLASE DE DEGRADACION MANIFESTADA	PROCESOS CAUSANTES	
Fuentes de Degradación en Imágenes	INTERACCION RADIACION-MATERIA	ATMOSFERA	<ul style="list-style-type: none"> -Fuera de foco -Reducción del contraste aparente 	Absorción
		ESCENA	<ul style="list-style-type: none"> -nubes -desafocamiento -Reducción de contraste -ensombrecimiento 	Dispersión Reemisión
	INTERFERENCIA DE MULTISISTEMAS			
	INSTRUMENTAL	DEFECTOS DEL SISTEMA OPTICO	<ul style="list-style-type: none"> -Deriva de calibración -Anisotropías -inhomogeneidades -Distorsión -Aberración cromática 	Desincronización de aparatos
		MOVIMIENTO RELATIVO	<ul style="list-style-type: none"> -Manchas -Deslizamientos 	Inoperabilidad de
		DEFECTOS EN LA ELECTRONICA DE LOS APARATOS	<ul style="list-style-type: none"> -Desafocamientos aparatos -Bandeamientos -Ruido 	Desgaste

TABLA 4.1

TABLA 4.2

CLASIFICACION DE FILTROS

DOMINIO ESPACIAL	de media de mediana de los k vecinos más próximos gradiente inverso multiplicativo de Lee Sigma de Wallis modificado	
DOMINIO DE LAS FRECUENCIAS	inverso	
	Pasa-bajas Pasa-altas Pasa-banda	ideal exponencial trapezoidal butterworth
	Wiener	

4.1. FILTROS EN EL DOMINIO ESPACIAL

Estos filtros se utilizan para suavizar imágenes degradadas por manchas, ruido aleatorio, etc. producto de deficiencias en los sistemas electrónicos de obtención de la imagen.

Tienen en común que trabajan en cada píxel a través de ventanas y emplean alguna medida estadística de la intensidad de los píxeles que se encuentran dentro de la misma para determinar los píxeles que serán tomados en cuenta, los cuales se promediarán y el valor resultante será sustituido en el píxel central.

4.1.1 FILTRO SIGMA

Este filtro está basado en la probabilidad Sigma de la distribución gaussiana. La idea básica es reemplazar el pixel a ser procesado, por el promedio de los pixeles vecinos que están en una ventana y su valor de intensidad caiga dentro de un intervalo sigma dado respecto al pixel central, donde sigma es la desviación estandar de la distribución de valores de los pixeles que se encuentran en la ventana.

Como se observará, este algoritmo, fácilmente excluye pixeles significativamente diferentes del promedio.

El procedimiento del filtro Sigma es como sigue:

- 1) Establecer un rango de intensidad $(x_c + \sigma, x_c - \sigma) \equiv I$, donde σ = desviación estándar
- 2) Sumar todos los pixeles que estan dentro del rango de intensidad en una ventana de tamaño $(2n + 1, 2n + 1)$.
- 3) Calcular el promedio, dividiendo la suma entre el número de pixeles en la suma.

Matemáticamente:

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{|i| \leq n} x_i$$

El ruido caracterizado por pocos pixeles se suaviza simplemente a través del promedio de las intensidades cuando el número de pixeles que tienen intensidades dentro del intervalo 2σ respecto al pixel central es menor que un valor especificado por el usuario. El filtraje sigma puede ser aplicado iterativamente, pero si la integridad de textura a escala pequeña se pretende mantener entonces es recomendable un intervalo en la intensidad de los pixeles menor que 2σ con solamente una o dos iteraciones.

4.1.2 ELIMINACION DE LA SEXTA LINEA

En las imagenes del LANDSAT 1, el detector de la sexta linea tuvo un problema de "hardware", por lo cual en la imagen aparecieron lineas de ceros (correspondientes al negro).

Para cada pixel de la linea afectada, se tomo el valor promedio de los pixeles correspondientes a las lineas de rastreo anterior y posterior; se calcularon y substituyeron, como se muestra a continuacion.

línea 5	31	31	25	03	00	00	00	00	00	00	00	14	22	21	23
línea 6	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
línea 7	31	31	31	27	05	00	00	00	00	00	00	10	24	26	26

despues de aplicar el filtro

línea 5	31	31	25	03	00	00	00	00	00	00	00	14	22	21	23
línea 6	31	31	28	15	02	00	00	00	00	00	00	10	24	26	26
línea 7	31	31	31	27	05	00	00	00	00	00	00	10	24	26	26

Este método es efectivo, aún para efectos de línea similares que se presentan en forma aleatoria y que no siguen un patrón sistemático.

4.1.3 BANDEAMIENTO DE LA SEXTA LINEA

En algunas ocasiones puede resultar, que con el tiempo, los detectores alteren su respuesta, ya sea a niveles mas altos o mas bajos. Por ejemplo, supongase que la respuesta ha aumentado una o dos unidades de gris de su valor original.

Un metodo de correccion para dicho efecto es emplear una rutina que barra en una imagen sin esa degradacion las lineas de rastreo y determina la amplitud de los valores de los pixeles.

Cualesquiera desviaciones de valores de pixeles de la imagen afectada respecto a la imagen sin degradación son detectados y se calcula un factor de corrección.

Ejemplo:	imagen sin degradacion	imagen degradada
linea 1	27 27 28 30 25	17 17 28 30 25
linea 2	26 26 30 30 31	13 13 15 15 15
linea 3	25 25 29 30 26	25 25 29 30 26

para la línea 2 $g(x,y) = k \cdot f(x,y)$

donde:

$g(x,y)$ es la imagen suavizada

$f(x,y)$ es la imagen degradada

k es el factor de corrección que en este caso vale 1/2

4.1.4 COMPENSACION DE LA LINEA DE RASTREO

En algunas imagenes, las lineas de muestreo están desfasadas horizontalmente respecto a líneas de muestreo adyacentes tanto en forma aleatoria como periodica.

Este defecto se vuelve importante cuando las imagenes se agrandan a escalas de 1:250,000 o mayores. La correccion se produce, alineando el inicio de cada linea de muestreo.

4.1.5 FILTRO DE MEDIA

El filtro de media opera con una ventana deslizante que corre un proceso de promedio. El corrimiento de la ventana en la técnica de promedio no requiere la sumatoria de todas las intensidades en cada ventana, más bien, la suma es retomada para cada nueva columna que entra y cada columna vieja que deja la ventana a medida que ésta se desliza horizontalmente a través de la imagen.

El modelo matemático de este filtro es :

$$g(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{(n,m) \in S} f(n,m)$$

donde:

$f(n,m)$ es la imagen degradada

$g(x,y)$ es la imagen suavizada

S es el conjunto de coordenadas de los puntos que están en la vecindad del punto (x,y)

M es el número total de puntos definidos por las coordenadas en S

4.1.6 FILTRO DE MEDIANA

Este filtro fue aplicado para el suavizamiento del ruido en imágenes empleadas por Pratt y Frieden (1980).

La intensidad del pixel central corresponde a la mediana de aquellos pixeles dentro de la ventana deslizante.

En su implantación más adecuada todas las intensidades en la ventana son almacenadas, ordenadas y la mediana es seleccionada. A pesar de que el ordenamiento consume tiempo de procesamiento, el filtraje se realiza con rapidez. Un algoritmo de mediana muy eficiente que corre en dos dimensiones y se basa en la modificación al histograma fue sugerido por Huang (1981).

4.1.7 PROMEDIO DE LOS K VECINOS MAS PROXIMOS

En este filtro se asume que las intensidades de la ventana local están decorrelacionadas. El algoritmo establece que se reemplace el nivel de gris del pixel central de la ventana deslizable por el promedio de sus k-vecinos cuyos niveles de gris son más cercanos al del pixel central.

Si dentro de una ventana, exactamente k-vecinos pertenecen a la misma población de niveles de gris entonces el algoritmo de k-promedio es óptimo.

El filtro puede aplicarse iterativamente a la imagen, cambiando el tamaño de la ventana y k para cada iteración. Davis y Rosenfeld (198), recomiendan $k = 6$ para una ventana de 3×3 pixeles.

4.1.8 FILTRO ADITIVO DE LEE

La suposición básica del filtro aditivo de Lee (Mastin, 1985) es que la muestra de la media y varianza de un pixel es igual a la media y varianza local de todos los pixeles dentro de una vecindad.

Específicamente, la imagen filtrada está dada por :

$$\hat{x}(i,j) = \bar{x}(i,j) + k(i,j) [z(i,j) - \bar{x}(i,j)]$$

es decir

$$\hat{x} = kz + \bar{x}(1-k), \quad k \neq 1$$

donde

$$z(i,j) = x(i,j) + w(i,j)$$

$z(i,j)$ = Imagen degradada con ruido, basada en el modelo
ruido aditivo

$w(i,j)$ es la componente del ruido.

$\bar{x}(i,j)$ = media aproximada de la imagen no degradada dada

$\bar{z}(i,j)$ = $\bar{z}(i,j)$, es decir, la media de la imagen no degradada se estima como la media local de la imagen degradada.

$k(i,j)$ = factor de ganancia definido entre 0 y 1 (para suavizamiento)

$$k(i,j) = \frac{G(i,j)}{G(i,j) - \sigma_1^2}$$

donde

$$G(i,j) = E [(z(i,j) - \bar{z}(i,j))^2] - \sigma_1^2$$

σ_1^2 = Estimación de la varianza del ruido aditivo.

4.2 FILTROS EN EL DOMINIO DE LAS FRECUENCIAS

Los filtros de esta clase trabajan en el espacio de frecuencias y para ello necesitan de una transformación.

Existen algunas transformadas que son de interés en el procesamiento de imágenes: la de Walsh, Hadamard, coseno discreto, Hotelling y Fourier.

Esta última es la usada con mayor frecuencia y a ella nos referimos en los siguientes filtros.

4.2.1 FILTRO INVERSO

El modelo matemático de una imagen en la que se considera una componente de ruido es

$$g(x,y) = \int \int h(x,y) f(x,y) dx_1 dy_1 + n(x,y)$$

al calcular la transformada de Fourier bidimensional se tiene

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) + N(u,v)$$

dado que F es la transformada de Fourier de la cantidad deseada, es decir, la distribución de energía del objeto entonces se calcula la cantidad \hat{F} , la transformada de Fourier de la imagen restaurada a través de una división:

$$\hat{F}(u,v) = \frac{G(u,v)}{H(u,v)} = F(u,v) + \frac{N(u,v)}{H(u,v)} \quad (4.1)$$

La aproximación a la restauración de la imagen dada por la ecuación anterior es lo que se conoce como filtrado inverso. La terminología surge de considerar a $H(u,v)$ como la función filtro que multiplica a $F(u,v)$ para producir la transformación de la imagen degradada $g(x,y)$. La división de $G(u,v)$ por $H(u,v)$ que se indica en la ecuación 4.1 constituye una operación de filtraje inverso en este contexto. La imagen restaurada se obtiene utilizando la relación

$$\begin{aligned} \hat{f}(x,y) &= \mathcal{F}^{-1}[\hat{F}(u,v)] \\ &= \mathcal{F}^{-1}[G(u,v) / H(u,v)] \end{aligned} \quad (4.2)$$

La ecuación 4.2 señala que las dificultades computacionales se encontrarán en el proceso de restauración si $H(u,v)$ se anula o llega a ser muy pequeña en alguna región de interés en el plano uv .

Una dificultad seria se podría presentar con la componente de ruido ya que si $H(u,v)$ es cero o muy pequeña el término de ruido podría dominar el resultado de la restauración (ver ecuación 4.1).

4.2.2 FILTRO PASA-BAJAS

Este filtro se trabaja en el espacio de frecuencias uv y parte de la relación:

$$G(u,v) = H(u,v) F(u,v)$$

donde:

$F(u,v)$ es la transformada de la imagen que se desea restaurar

el problema es seleccionar una $H(u,v)$ que genere $G(u,v)$ a través de la atenuación de las componentes de alta frecuencia de $F(u,v)$. La transformada inversa de $G(u,v)$ entonces generará la imagen restaurada deseada $g(x,y)$.

Debido a que se filtran las altas frecuencias y se dejan pasar las bajas frecuencias, a éste se le conoce con el nombre de filtro pasa-bajas.

Análogamente, cuando se filtran las bajas frecuencias y se dejan pasar las altas frecuencias se tiene un filtro llamado filtro pasa-altas.

De la misma manera, cuando se filtra un intervalo de frecuencias intermedias se genera un filtro llamado pasa-banda.

Finalmente, dependiendo de la expresión matemática que se le asigne a $H(u,v)$ se tienen diferentes clases de filtros pasa-bajas.

Por ejemplo: $H(u,v) = \begin{cases} 1 & \text{si } D(u,v) \leq D_0 \\ 0 & \text{si } D(u,v) > D_0 \end{cases}$ Filtro Ideal

donde: D_0 es una cantidad positiva especificada y $D(u,v)$ es la distancia del punto (u,v) al origen del plano de frecuencias, es decir,

$$D(u,v) = \{u^2 + v^2\}^{1/2}$$

4.3 FILTROS DESARROLLADOS EN EL PRESENTE TRABAJO

4.3.1 FILTROS DESARROLLADOS EN EL DOMINIO ESPACIAL

INTRODUCCION

El filtraje espacial es aquel que se aplica directamente a la imagen.

Como ejemplo se puede citar la imagen de Saturno (fig. 5.1), la cual fue bandeada (fig. 5.2), para simular la degradación con que fueron afectadas miles de imágenes del LANDSAT-1 debido a la inoperabilidad inesperada de uno de los detectores que barrían la escena.

El filtro aplicado a este bandeamiento fue el siguiente :

- a) Filtro de Media - aplicado al renglón anterior y al posterior de la línea o renglón bandeado.

Matemáticamente, el promedio es el siguiente

Para $i, j = 1, \dots, n$

$$M(i, j) = [M(i, j-1) + M(i, j+1)] / 2$$

La imagen restaurada la podemos encontrar en la fig. 5.3.

- b) Filtro Media.- aplicado a una ventana deslizable sobre un renglón de 3×3 pixeles.

Este filtro se aplica también a la imagen 2' bandeada (fig. 5.2) y su formulación matemática es como sigue:

$$M(i,j) = \sum_i \sum_j M(i,j) / 9$$

El resultado aplicado una vez, se muestra en la fig. 5.4, aplicado dos veces se muestra en la fig. 5.5, y aplicado por tercera vez se muestra en la fig. 5.6

c) Filtro Media.- también se aplicó el filtro a la imagen bandeada de Saturno, utilizando una ventana de 5 X 5 pixeles, obteniendo el promedio y sustituyendolo por el pixel central de la imagen.

El resultado del filtraje lo podemos visualizar en las imágenes de las fig. 5.7 y 5.8 del capítulo 5 al aplicarse el filtro una y dos ocasiones respectivamente.

Matemáticamente tenemos

$$M(i,j) = \sum_i \sum_j M(i,j) / 25 \quad \text{para } i,j = 1, \dots, n$$

Debido al fuerte contraste entre la degradación y la imagen y a que ésta no fue muy compleja se esperan resultados de restauración buenos y evidentes al ojo humano e inclusive que sean mejores ante procesos de iteración.

Los resultados en general fueron como se esperaban (ver capítulo 5), sin embargo, como lo mencionan algunos investigadores, el número de iteraciones depende de cada caso particular, es decir, del tamaño de la ventana, tamaño de la mancha, grado de contraste, etc.

4.3.2 FILTROS DESARROLLADOS EN EL DOMINIO DE LAS FRECUENCIAS

El dominio de las frecuencias nos abre un campo muy amplio para aplicar filtros, tanto para realces como para restauración de imágenes.

Para ello, ejemplificamos con los siguientes casos:

- a) Filtrado inverso
- b) Restauración de bandeado de alta frecuencia, con la aplicación de un filtro pasa-bajas ideal.
- c) Restauración de ruido aditivo gaussiano, por medio de un filtro pasabajas. Ver el capítulo cinco sobre los resultados obtenidos acerca de estos filtros.

En el caso (b), el bandeado introducido, es de alta frecuencia y se visualiza en el espectro de Fourier en forma de lóbulos brillantes en el eje "y" del espacio de frecuencias, esto se obtiene por comparación con el espectro de la imagen no degradada, la que está libre de estos patrones. Detectado esto, se aplica un filtro pasa-bajas en esta dirección y se observa la eliminación del bandeado al recompar la imagen con la transformada inversa de Fourier, aunque también se aprecia otra degradación en la imagen restaurada que tiene que ver con información filtrada junto con el ruido..

Con un filtro pasa-bajas en las dos direcciones se aprecia, una degradación más fuerte en la información original. Podemos concluir que como el bandeado corresponde a una frecuencia bien definida, el filtro adecuado debe ser un filtro pasa-banda.

Para el caso (c) el ruido gaussiano aleatorio introducido fue de origen unidimensional, aplicado a renglones y columnas, también de alta frecuencia y aplicando un filtro pasa-bajas se observa eliminación de gran parte del ruido.

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Un primer filtro, desarrollado en el dominio espacial, fue implementado en la computadora HF-9000 del Instituto de Geofísica para restaurar una imagen que previamente se degradó, con el propósito de simular el efecto presentado en las primeras imágenes Landsat, donde el sexto sensor dejó de funcionar y las imágenes generadas presentan bandeamiento cada seis líneas. Ya que una gran cantidad de información estaba contenida en estas imágenes y no era posible dejarla perder, las investigaciones se dirigieron entonces a la búsqueda de técnicas para restaurar dichas imágenes.

Es conveniente mencionar que este efecto también se puede presentar al digitalizar imágenes, tomar o imprimir una imagen, ya que estos (excepto la toma de fotografías) funcionan a través de barridos por líneas horizontales y sabemos que no hay instrumentos cien por ciento perfectos y por lo tanto al fallar aparecen efectos de bandeamiento de diverso grado en las imágenes. Este efecto es totalmente aleatorio porque no es repetitivo como en el caso de las primeras imágenes del LANDSAT.

El primer filtro consistió en promediar los valores de tonos de la línea anterior y posterior a la línea bandeada (ventana de 3x1 pixels) y el pixel central perteneciente a la banda se reemplazó por este valor promedio, es decir:

28	30	22	24	31	31
00	00	00	00	00	00
00	00	07	22	28	28

ventana con
bando

28	30	22	24	31	31
14	15	14	23	29	29
00	00	07	22	28	28

ventana filtrada

28	30	22	24	31	31
07	22	30	28	23	27
00	00	07	22	28	28

ventana sin
degradación

$$M(i, j) = [M(i-1, j) + M(i+1, j)] / 2$$

El resultado obtenido, al aplicar este filtro a la imagen de Saturno bandeado (figura 5.2) es evidente, pues mientras en la imagen de la figura 5.2 no hay manera de definir con claridad los rasgos de ese cuerpo, en la figura 5.3, la definición del cuerpo es completa (Comparar con la figura 5.1 que corresponde a Saturno sin degradación).

Para evaluar cuantitativamente este resultado se comparó cada pixel de un perfil de la imagen restaurada con su correspondiente en la imagen original, se calcularon las diferencias en tonos de gris (ver tabla 5-1) y se obtuvieron los siguientes parametros estadísticos.

Para el caso del analisis de la línea 36, que está en el centro de la imagen se tiene:

- TOTAL (suma de tonos de gris) = 67.00
- Promedio = 1.3594
- Desviación Medía = 1.3779
- Varianza = 3.0740
- Desviación estandar = 1.7533
- Coefficiente de variación = 1.2878

Para el caso de la línea bandeda número 39 se obtuvieron los siguientes parametros estadísticos:

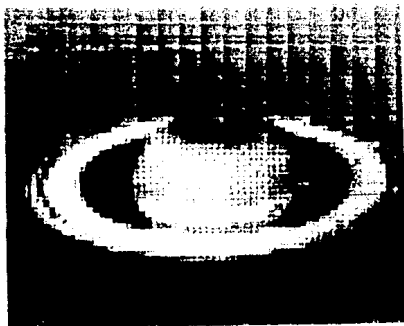


FIG. 5.1 IMAGEN ORIGINAL DEL PLANETA SATURNO

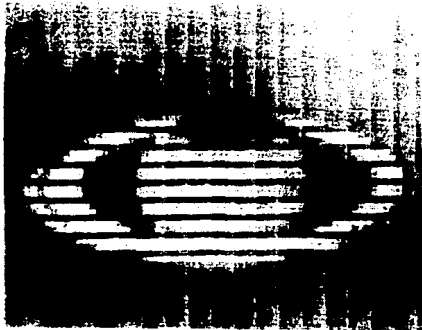


FIG. 5.2 IMAGEN DEL PLANETA SATURNO DEGRADADA
POR BANDEAMIENTO SISTEMATICO

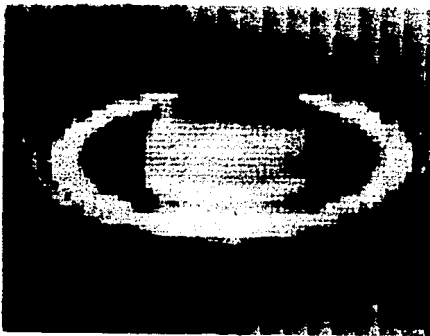
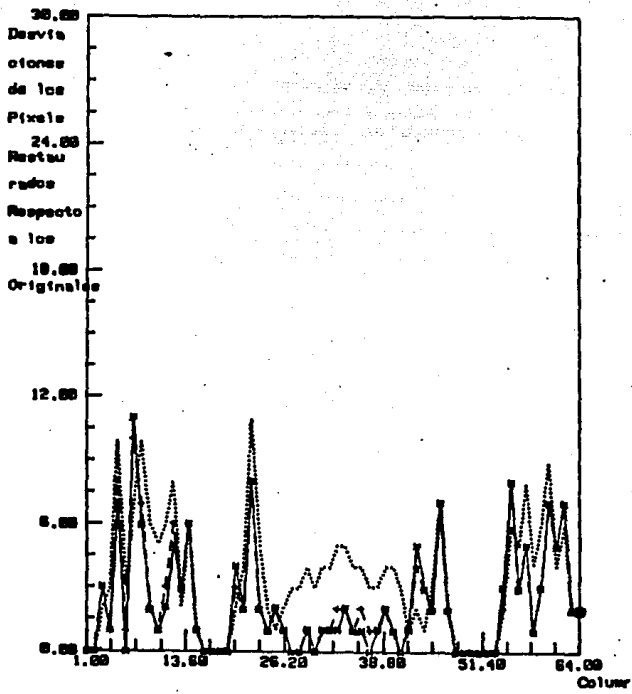


FIG. 5.3 RESTAURACION DE LA IMAGEN ANTERIOR AL
APLICAR EL FILTRO DE MEDIA
VENTANA 3X1 PÍXELES



Grafica 5-1 Linea 36 (.....)
 Linea 39 (—)
 Linea 42 (continua)

TOTAL (tonos de gris) = 210.00
Promedio = 3.2812
Desviación media = 2.8066
Varianza = 13.5459
Desviación estándar = 3.6805
Coeficiente de variación = 1.1217

Finalmente para un tercer muestreo, línea 42, los parámetros correspondientes fueron:

TOTAL (suma de tonos de gris) = 301.00
Promedio = 4.7051
Desviación media = 3.5063
Varianza = 17.0212
Desviación estándar = 4.1257
Coeficiente de variación = .8772

En la gráfica 5.1 se muestran los resultados obtenidos para la aplicación del filtro de media con una ventana de 3x1 píxeles. Nótese la gran reducción en el grado de desviación de la imagen restaurada a la degradada respecto a la imagen original del planeta Saturno.

Estos filtros dan buenos resultados tanto a imágenes degradadas por bandeamientos, los cuáles pueden ser: horizontales, verticales o diagonales, como a imágenes dañadas cuyo aspecto es el de estar salpicadas (moteadas).

Este filtro resulta ineficiente para imágenes que tienen degradaciones que ocupan áreas grandes en la imagen, como pueden ser: nubes, deslizamientos, saturación en la fotoionización, bandeamientos anchos, entre otros, esto es debido a que al llevarse a cabo el proceso de promedio, en algunos casos el píxel central a sustituir sigue teniendo el mismo valor en tonalidad por

estar en medio del área degradada, en otros casos, ese valor del pixel central puede suavizarse por estar en una posición de frontera entre el área de degradación y el área de imagen sana, sin embargo el área principal de degradación sigue prevaleciendo.

Hay que tomar en cuenta también que al agrandar la ventana, se tiende a degradar la imagen.

Por otro lado, este filtro puede aplicarse en términos de interpolación a toda el área de degradación, es decir, se promedia el contorno de área sana alrededor de la degradación y cada uno de los pixels pertenecientes a esta área son sustituidos por el promedio, desde luego el detalle fino no es rescatado, pero la apreciación de la imagen es mejor.

En la tabla 5.1 se muestra el funcionamiento del filtro de media para las líneas 36, 37 y 42.

TABLA DE TONOS DE GRIS, FILTRADOS POR PROMEDIO ENTRE LINEAS

LINEAS DEGRADADAS : 36, 39, Y 42

35	36	37	38	39	40	41	42	43
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0
15	11	7	1	0	0	0	0	0
27	24	22	14	7	0	0	0	0
13	21	29	27	15	3	0	0	0
20	16	12	26	22	19	2	1	0
31	29	27	12	21	30	14	7	0
31	31	31	31	29	26	28	14	0
31	31	31	31	24	17	30	15	0
31	31	31	31	30	30	22	14	7
25	28	31	31	31	31	24	23	22
3	15	27	31	31	31	31	29	23
0	2	5	26	28	31	31	29	28
0	0	0	4	17	31	31	29	26
0	0	0	0	15	31	31	23	26
0	0	0	0	12	25	31	31	31
0	0	0	0	3	7	31	31	31
0	0	0	0	0	0	29	30	31
0	0	0	0	0	0	15	23	31
14	10	7	2	1	0	1	16	31
22	24	27	23	11	0	0	15	31
21	26	31	30	20	11	7	19	31
23	26	30	31	25	20	17	24	31
24	26	28	30	26	23	13	22	31
25	26	27	31	23	27	16	23	31
25	25	26	31	30	25	20	25	31
25	25	26	31	31	31	22	26	31
26	26	26	30	30	30	25	28	31
27	25	24	29	29	30	26	28	30
27	26	25	29	30	31	26	27	29
27	26	25	29	29	30	27	27	28
26	26	26	26	29	30	28	28	26
25	24	24	26	29	30	28	26	28
24	24	24	27	29	31	26	26	26
24	23	23	26	23	30	26	26	27
23	23	23	27	28	29	24	26	26
20	20	21	26	27	29	22	25	28
20	19	19	27	27	27	17	22	29

TABLA 5-1

35	36	37	38	39	40	41	42	43
18	29	22	27	25	24	13	20	28
17	19	21	28	24	21	9	19	29
13	18	23	26	20	15	8	18	28
12	18	24	24	17	10	10	19	28
11	17	25	18	10	3	7	18	29
6	11	15	8	4	0	0	14	27
3	1	0	0	0	0	0	14	25
0	0	0	0	0	0	13	20	27
0	0	0	0	0	0	25	25	26
0	0	0	0	2	4	26	24	23
0	0	0	0	10	21	26	22	18
0	0	0	0	13	26	27	20	13
0	0	0	0	13	26	27	20	14
0	0	0	15	22	26	13	12	12
0	8	17	16	26	28	19	10	2
7	16	25	25	25	24	6	3	0
23	24	26	25	18	11	7	3	0
27	26	25	26	13	1	7	3	0
26	25	25	19	15	11	0	0	0
26	21	17	0	1	2	0	0	0
21	10	0	8	4	0	0	0	0
0	5	10	5	2	0	0	0	0
1	6	2	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	0	0

CONTINUACION DE LA TABLA 5-1

Observese que las líneas 36, 39 y 42 resultan de promediar sus líneas vecinas, anteriormente poseían el tono de gris cerc (negro).

Notez que el bandeamiento se ha reducido enormemente, sin embargo, como puede observarse en la gráfica 5.1, hay píxeles que tienen desviaciones un poco grandes, las cuales reflejan que estas zonas son de alto contraste, entonces el píxel restaurado tiene un valor promedio entre sus vecinos y no su valor real que debía caer en alguna de las dos regiones de alto contraste.

Continuando con este análisis y con el fin de que sea más versátil el algoritmo con el mismo principio de promedio se implementó el filtro media, utilizando los pixeles vecinos que están dentro de una ventana de determinado tamaño.

Así se consideró en primer lugar, una ventana de 3x3 pixeles, cuyo elemento central corresponde al pixel a restaurar, los resultados de la aplicación de este filtro se muestran en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 donde podemos observar que los resultados óptimos desde el punto de vista cualitativo se obtienen en la tercera iteración. Esto se debe, ante todo, a que el suavizamiento es paulatino, por tener más elementos de tonalidad. Ahora bien, en el caso particular del bandeamiento en la imagen de Saturno, se observó que empleando una ventana pequeña se llega rápidamente a resultados visuales aceptables.

El modelo matemático para este filtro es el siguiente:

1	2	3
4	M_{ij}	5
6	7	8

$$M(i,j) = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{l=1}^{j-1} [M(k,l) - M(i,j)] / 8$$

Este modelo puede diversificarse en su aplicación y eficiencia dependiendo de la función estadística que se emplee a los pixeles vecinos para el caso del pixel central anómalo.

Esto quiere decir, que además del promedio es posible utilizar otras medidas de tendencia central como son la moda y la mediana, las cuales en algunos casos particulares pueden dar buenos resultados. Su aplicación depende de la distribución que mantengan las intensidades de los pixeles vecinos y del tamaño de la ventana.

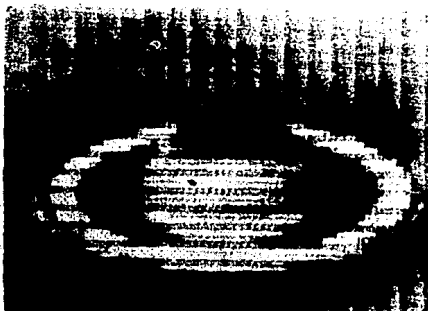


FIG. 5.4 RESTAURACION DE LA IMAGEN DE LA FIG. 5.2
AL APLICAR EL FILTRO DE MEDIA
VENTANA 3X3
1^a ITERACION



FIG. 5.5 RESTAURACION DE LA IMAGEN DE LA FIG. 5.2
AL APLICAR EL FILTRO DE MEDIA
VENTANA 3X3
2^a ITERACION



FIG. 5.6 RESTAURACION DE LA IMAGEN DE LA FIG. 5.2
AL APLICAR EL FILTRO DE MEDIA
VENTANA 3X3
3^a ITERACION

En las gráficas 5.2 y 5.3 se observan las desviaciones obtenidas respecto a la imagen original, aplicando el filtro de media con una ventana de 3x3 píxeles. En las gráficas se aprecia que en la tercera iteración el suavizamiento es óptimo ya que en una cuarta iteración (no aparece en la gráfica) no se aprecia mejora.

Finalmente el filtro se probó con una ventana de 5x5 píxeles, observándose lentitud en la restauración y necesidad de realizar más iteraciones, y por consiguiente más tiempo de procesamiento (figura 5.7 y 5.8).

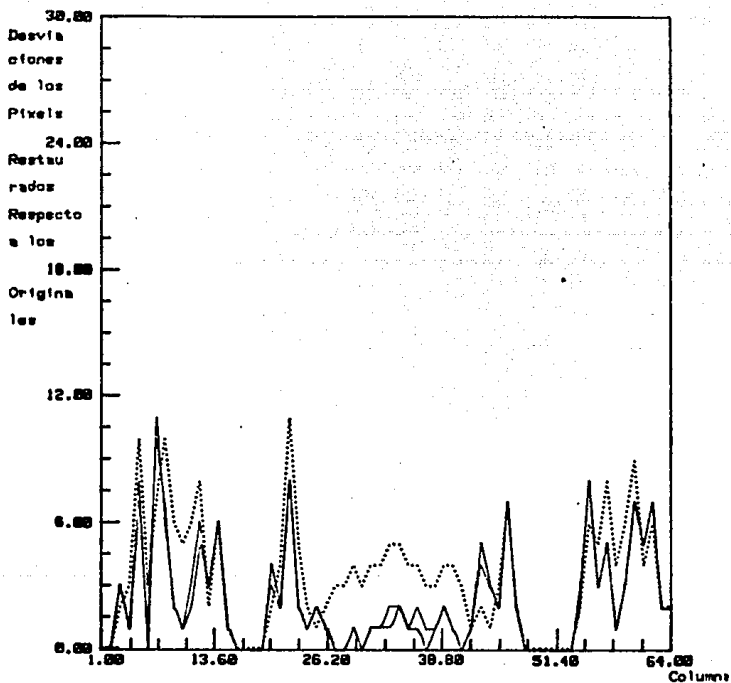
Es oportuno mencionar que el tiempo de procesamiento es un factor que interviene en la eficiencia de un filtraje.

El siguiente resultado obtenido fue el haber implantado el algoritmo de la Transformada de Fourier bidimensional para lo cual se hicieron pruebas con imágenes sencillas, como se muestra en las figuras 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12, donde podemos observar los espectros de Fourier de algunas funciones simples, como por ejemplo la función escalón, cuyo espectro es la función "sinc"; también se muestra el espectro de una red de funciones escalón, donde se observa la superposición de una red de funciones "sinc" en sus extremos, finalmente se visualiza el espectro de una línea vertical.

La prueba y puesta en marcha de este algoritmo forma parte importante de este trabajo puesto que con él se trabajan algunas imágenes en el espacio de frecuencias.

El siguiente ejemplo se refiere a la misma imagen de Saturno bandeados pero ahora analizada en el espectro de frecuencia a través de la Transformada de Fourier. En la figura 5.13 se observa el espectro de potencia de la imagen de Saturno

LINER 36



Grafica 5-2 Primera iteracion (.....)
 Segunda iteracion (-----)
 Tercera iteracion (————)

LINER 39

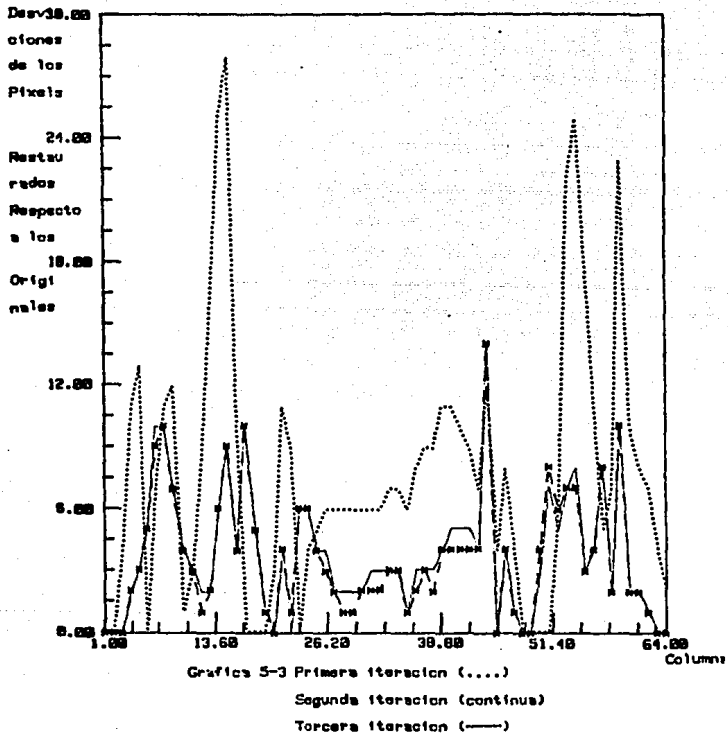




FIG. 5.7 RESTAURACION DE LA IMAGEN DE LA FIG. 5.2
AL APLICAR EL FILTRO DE MEDIA
VENTANA 5X5
1^a ITERACION

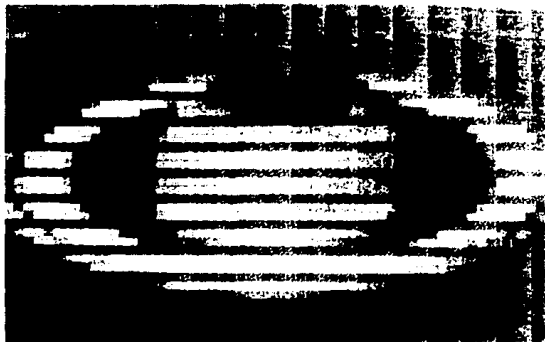


FIG. 5.8 RESTAURACION DE LA IMAGEN DE LA FIG. 5.2
AL APLICAR EL FILTRO DE MEDIA
VENTANA 5X5
2^a ITERACION

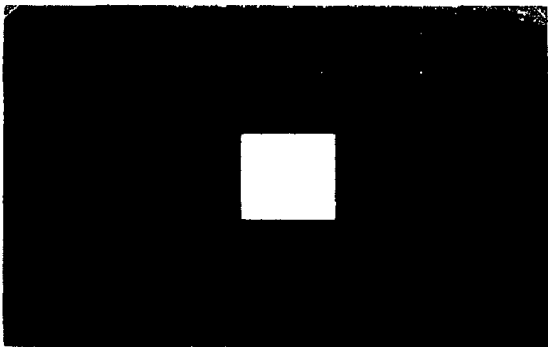


FIG. 5.9 IMAGEN SIMPLE DE UN CUADRO DE 64X64
PIXELS. TONO MAXIMO 31.

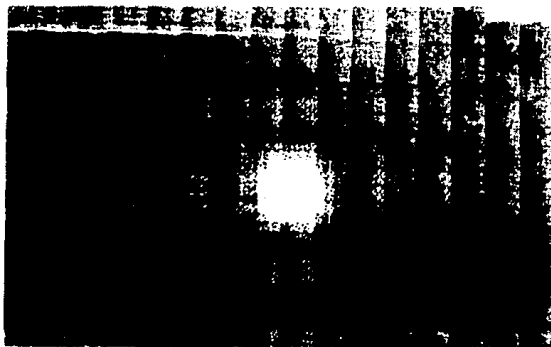


FIG. 5.10 ESPECTRO DE FOURIER DE LA IMAGEN
ANTERIOR.

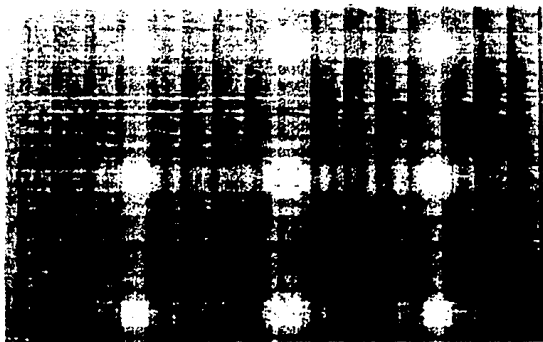


FIG. 5.11 ESPECTRO DE FOURIER DE UN CONJUNTO
DE 6 CUADROS.

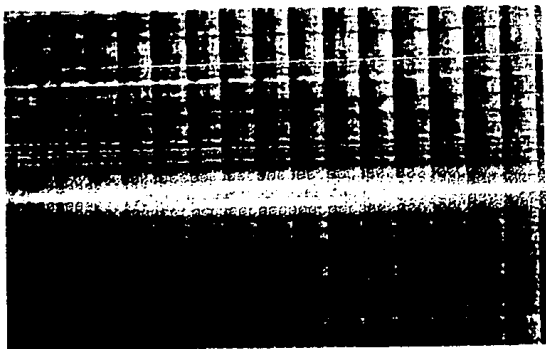


FIG. 5.12 ESPECTRO DE FOURIER DE UNA LINEA
DELGADA VERTICAL

original (sin degradación) y la de Saturno bandeado, notándose inmediatamente las zonas (intervalos de frecuencias) correspondientes al bandedo. Luego se procedió a eliminar las altas frecuencias en las dos direcciones tratando de quitar los lóbulos que caracterizan al bandedo, el resultado obtenido se muestra en la figura 5.14, donde se observa la imagen de Saturno un tanto difusa pero sin bandedamiento. La difusión se debe a que al aplicar un filtro pasa-bajas ideal con frecuencia de corte igual a la mitad del intervalo total de frecuencias, se elimina información de la imagen misma que se caracteriza por pertenecer a altas frecuencias en las dos direcciones.

El siguiente factor de degradación a trabajar es el ruido aditivo, para ello a la imagen que se muestra en la figura 5.9 se le fue adicionado ruido aditivo a través de una función generadora de números aleatorios de tipo gaussiano o normal, esta función genera números en el intervalo $(0,1)$.

El aspecto de la imagen anterior con el ruido aditivo se muestra en las figuras 5.15 y 5.16, tanto en una como en dos direcciones, respectivamente.

Al obtener su transformada de Fourier (figura 5.17) se observó el ruido, procediendo a aplicarle un filtro pasa-bajas ideal, como en el caso anterior, se obtuvieron resultados aceptables (fig 5.18).

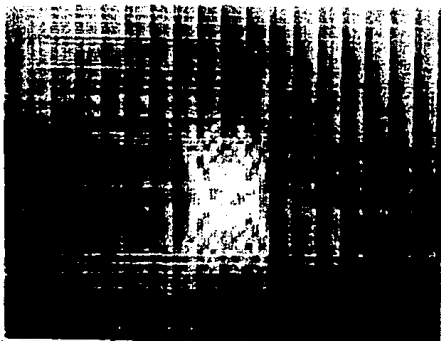


FIG. 5.13.a ESPECTRO DE POTENCIA DEL PLANETA
SATURNO

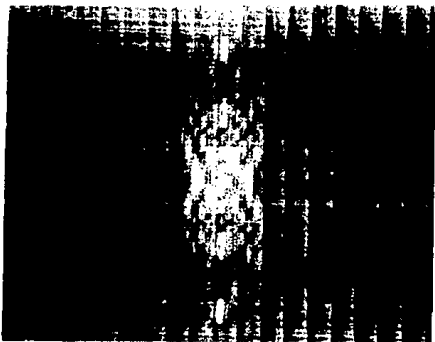


FIG. 5.13.b ESPECTRO DE POTENCIA DEL PLANETA
SATURNO CON BANDEAMIENTO



FIG. 5.14 RESTAURACION DE LA IMAGEN ANTERIOR
AL APLICAR UN FILTRO PASA-BAJAS

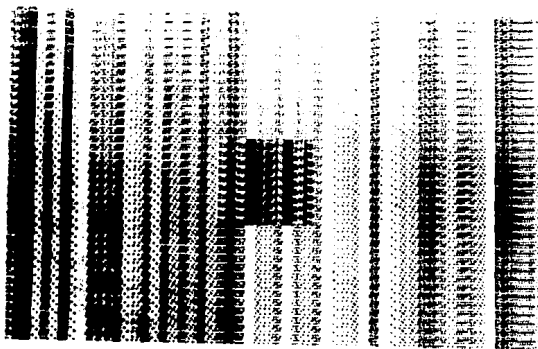


FIG. 5.15 IMAGEN DE LA FIG. 5.9 ADICIONADA
CON RUIDO GAUSIANO EN UNA DIRECCION

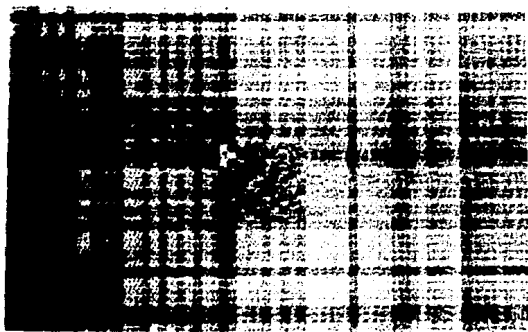


FIG. 5.16 IMAGEN DE LA FIG. 5.9 ADICIONADA CON
RUIDO GAUSIANO EN DOS DIRECCIONES

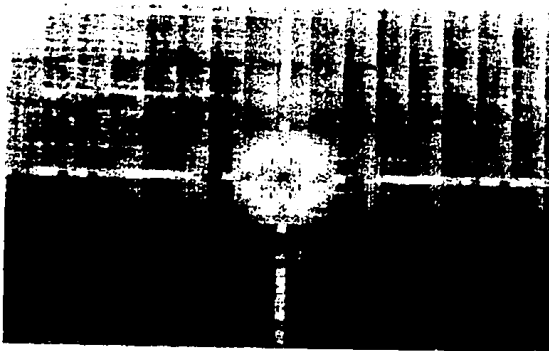


FIG. 5.17 ESPECTRO DE FOURIER DE LA IMAGEN
ANTERIOR



FIG.5.18 RESTAURACION DE LA IMAGEN ANTERIOR
AL APLICAR UN FILTRO PASA-BAJAS

Finalmente, el tercer factor de degradación trabajado en esta tesis fué el desafocamiento, para ello se digitizó una imagen que contenía un punto negro sobre fondo blanco (fig. 5.19) y cuatro imágenes más del mismo punto pero desafocadas gradualmente.

Al observar estas imágenes se nota ruido provocado por la no adecuada iluminación, manifestándose este en un reflejo sobre el punto (lado derecho) y sombras en los extremos superior e inferior del lado derecho.

El perfil del punto se muestra en la gráfica 5-4. Notese que la cresta no es horizontal, sino mantiene un cierto grado de inclinación que significa una pérdida en el tono de gris del punto.

El nivel de desafocamiento fué muy poco de tal manera que no se apreciaba degradación hasta cuando se grafican los perfiles.

En la fig. 5.20 se aprecia el espectro de Fourier del punto y en la 5.21 el mismo espectro pero filtrado en altas frecuencias.

En vista de lo anterior, lo único que se aplicó a una de las imágenes desafocadas fué un realce de borde a través de un filtro de modificación al histograma, es decir, todos los píxeles a partir de un cierto nivel de gris se les asignó el mismo valor de gris y el resultado se muestra en la figura 5-22.

A continuación se desarrolla un modelo propuesto de difusión para desafocamiento de imágenes:

Se hace una comparación con la atmósfera, ya que esta tiene un efecto como de desafocamiento, por lo tanto podríamos atacar el problema siguiendo el modelo de difusión que para la dispersión producida por la atmósfera proponen Lira y Oliver (1983)

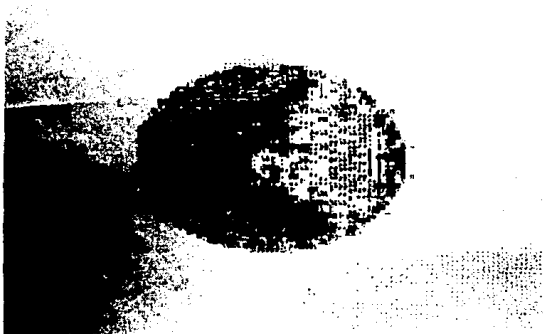


FIG. 5.19 IMAGEN DE UN PUNTO DESAFOCADO.



FIG. 5.20 ESPECTRO DE FOURIER DE LA IMAGEN
ANTERIOR

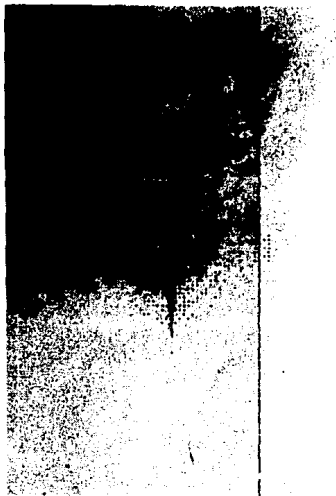
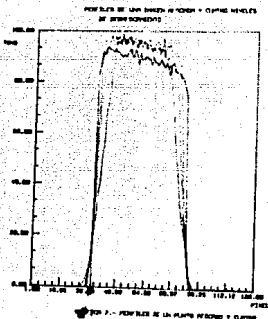


FIG. 5.21 ESPECTRO DE FOURIER FILTRADO
PARA BAJAS FRECUENCIAS



FIG. 5.22 RECUPERACION DEL PUNTO DESAFOCADO CON
LA TRANSFORMADA INVERSA DE FOURIER



GRAFICA 5.4

Cuando un pulso de onda es transmitido a través de un medio difusivo (en este caso a través de un sistema óptico con desafocamiento), una cola retrasada aparece, debido a la dispersión múltiple de la radiación incidente con los elementos del medio. El ensanchamiento del pulso depende de las características del medio y de la longitud de onda. De esta manera si la radiación de una fuente puntual representada por una delta de Dirac es extendida en una cierta región del espacio como resultado de la dispersión difusa, el ancho del pulso resultante dependerá de la función de transferencia de impulso del medio. Así el proceso de degradación de imágenes de satélite o de avión debido a dispersión de luz, podría ser descrita por la ecuación de difusión que de una solución relativamente simple y buena al problema. $g(x,y,t)$ es la información recibida en el sensor después de un proceso de difusión, la siguiente ecuación debe satisfacerse:

$$\frac{\partial g(x,y,t)}{\partial t} = D(\lambda, d) \nabla^2 g(x,y,t) \quad (5.1)$$

donde D es el coeficiente de difusión que depende de la longitud de onda λ y la geometría (en especial del espesor de las lentes, d) del sensor. La ecuación 5.1 es de difusión bidimensional, puesto que las características a lo largo de la dirección horizontal se suponen constantes. La solución (Margenau, Murphy, 1945) de esta ecuación es

$$g(x,y,t) = \frac{1}{4D^2 t} \iint g_0(x',y',t) \exp[-(r-r')^2/4Dt] dr' \quad (5.2)$$

donde g_0 es la condición inicial y es función de x' únicamente, y las constantes involucradas en la integración podrían determinarse de condiciones en la frontera. Es claro de 5.2 que la radiación de una fuente puntual es difundida en cierta región del espacio como

una distribución gaussiana con varianza proporcional a Dt . Ahora si $g(x,y,t)$ es la información que recibe el sensor desde un objeto después de algún tiempo t , y la información sin distorsión $f(x,y)$ es $g(x,y,0)$. Entonces si $g(x,y,t)$ es expandida en una serie de Taylor alrededor de $t=\tau$, entonces

$$g(x,y,0) = g(x,y,\tau) - \tau \frac{\partial g(x,y,t)}{\partial t} + \frac{\tau^2}{2} \frac{\partial^2 g(x,y,t)}{\partial t^2} - \dots \quad (5.3)$$

si los términos de segundo orden y mayores son ignorados de esta ecuación, y con 5.1 la imagen sin distorsión puede ser escrita como

$$f(x,y) = g(x,y,\tau) - \tau \nabla g(x,y,\tau) \quad (5.4)$$

la sección transversal de dispersión total σ da una medida de la fracción de la radiación dispersada con respecto a la radiación incidente, y puede ser vista como la probabilidad de que una cierta cantidad de dispersión ocurra. Esta cantidad da el grado de difusión que el medio provoca sobre la radiación en su trayectoria desde el objeto hasta el sensor, y este debe estar en relación directa con el coeficiente de difusión y el tiempo que le ha tomado al proceso de difusión, o equivalentemente con la distancia al sensor. Por lo tanto la sección transversal de dispersión podría igualarse con τD .

Para concluir este análisis de resultados es conveniente señalar que en las imágenes aparece un fondo cuadrículado, el cual es debido exclusivamente a la impresora.

CONCLUSIONES

- 1) La Restauración de Imágenes es un tema de muy amplia aplicación que se puede abordar por diversos caminos.

Su aplicación abarca desde dimensiones microscópicas: fotografía a través de fibras ópticas del interior de organismos vivos, trazas nucleares, etc. hasta dimensiones macroscópicas: fotografía astronómica, pasando desde luego por las imágenes de satélite, de avión o fotografías personales. Mientras los caminos se concentran en el manejo de filtrajes en el dominio espacial y en el dominio de las frecuencias.

- 2) Los filtrajes trabajados en esta tesis se centraron en las siguientes degradaciones:
 - a) bandeamientos
 - b) ruido aditivo
 - c) desafocamiento

Para el primer caso, el análisis de la degradación se realizó tanto en el dominio espacial como en el dominio espectral.

El análisis espacial se llevó a cabo a través de la aplicación del filtro estadístico de Media para ventanas de tamaño 1×3 , 3×3 y 5×5 píxeles.

Para la ventana de 1×3 la restauración se apreció de inmediato. Para el caso de la ventana de 3×3 la

restauración se apreció buena hasta la tercera iteración. En cambio, utilizando una ventana de 5×5 , la restauración es mínima en la segunda iteración.

Para este caso tan particular resulto muy efectivo el filtro de media con ventana de 1×3 . Además, podemos afirmar que con una ventana grande v en la medida que lo sea más tendremos dos problemas: la restauración tiende a ser lenta, por lo que requiere un mayor número de iteraciones y por consecuencia necesita más tiempo de procesamiento computacional.

El análisis espectral de la misma degradación resulto muy enriquecedora ya que en el espacio de frecuencias la degradación fue muy notable, aunque ésta se encontró sobrepuesta en frecuencias de la propia imagen de tal manera que al filtrarla también se afectó a la imagen.

La degradación por ruido aditivo se analizó solamente a través del dominio de frecuencias ya que por el dominio espacial no se vislumbró algún filtraje estadístico adecuado.

En cambio al aplicar la Transformada de Fourier y filtrar las altas frecuencias (en ellas se encontraba el ruido con toda claridad) se obtuvieron resultados muy buenos puesto que se recuperó la imagen, un poco alterada debido a que sus bordes fueron suavizados.

El filtraje en el dominio espectral es muy efectivo para casos como el anterior, así como tiene un efecto de suavizamiento de bordes cuando se filtran las altas frecuencias.

3) El último caso analizado fue un punto desenfocado, al cual por las circunstancias únicamente se le aplicó un resaca de borde, es decir, las imágenes desenfocadas fueron captadas por una cámara digitalizadora y presentaron muy poca variación con respecto a la original. Su diferencia solamente es apreciada en la gráfica 5-4 que muestra los perfiles de la imagen.

El filtraje realizado fue una modificación al histograma, es decir, en el intervalo donde se presentó el impulso correspondiente al punto (fig. 5-4) se fijó un solo valor en la tonalidad de los píxeles de tal manera que la cresta del pulso quedó completamente horizontal, así, el resultado fue un punto muy claro, muy delimitado y nítido.

Sin embargo, se ha propuesto un modelo teórico para corregir este último tipo de degradación, en el que la intensidad puntual (pixel) se dispersa como una distribución gaussiana con varianza proporcional a Dt . Este modelo está basado en el modelo de difusión para el efecto de dispersión atmosférica, ya probado en la práctica y se espera que sea de gran utilidad.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- Ekstrom Michael P.
Digital Image Processing Techniques
1984. Academic Press, Inc.
- 2.- Slater, Philip N.
Remote Sensing, Optics and Optical Systems
1980. Addison-Wesley Publishing Company
- 3.- Richards, J.A.
Digital Image Processing
1986
- 4.- Bracewell, R.M.
The Fourier Transform and its Applications
1965. McGraw Hill Book Company
- 5.- Resnick, Robert
Conceptos de Relatividad y Teoría Cuántica
1972. Editorial LINUSA
- 6.- Margenau y Murphy
The Mathematics of Physics and Chemistry
1965. D. Van Nostrand Company, Inc.
- 7.- Kondratyev
Radiation in the atmosphere
1963, Academic Press
- 8.- Cracknell y Hayes
Remote Sensing Yearbook
1980. Editorial Taylor and Francis
- 9.- Scanvic, Jean-Yves
Utilisation de la Télédétection dans les Sciences de la Terre
1987, Bureau de recherches géologiques et minières
- 10.- Vernberg, F. John
Diemer, Ferdinand P.
Processes in Marine Remote Sensing
1962, The Belle W. Baruch Library in Marine Science
No.12

- 11.- Jae S. Lym y H. Nawab
Techniques for Speckle noise removal
Optical Engineering, 20, 1981, pp 472-480
- 12.- T. S. Huang
Some notes on film-grain noise in Restoration of
atmospherically Degraded Images
Woods Hole Oceanographic Institution
Woods Hole, Mass. 1966
- 13.- Andrews y S. R. Hunt
Digital Image Restoration
Prentice Hall, 1977
- 14.- Gonzalez, Rafael C.
Digital Image Processing
Addison Wesley, 1977
- 15.- Fundamentals of Remote Sensing
Minicourse Series in a Continuing Education
Activity of Purdue University
- 16.- Lira, Jorge y Oliver, Alicia
A diffusion Model to Correct Multispectral Images for the
Path-radiance Atmospheric Effect
NATO ASI Series, vol F3, Pictorial Data Analysis
Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1983
- 17.- Lira, Jorge y Carrera, Jorge
Mathematical Modelling of Natural Resources Gauges from the
Sensing Standpoint
Comunicaciones Técnicas, ISUNAM, 1987
- 18.- Berriel, L.R. , Pescos, T. y Santiesteban, A.
Image Restoration for a Defocused Optical System
Applied Optics, vol 22, No 16, 1983
- 19.- Garcia Soto, Fernando
Relevantes Aplicaciones del Mapeador Tematico de los
LANDSAT 4 y 5
VIII Congreso Nacional, Sociedad Mexicana de Fotogrametria,
Fotointerpretacion y Geoesia
Morelia, Michoacan, 1985

- 20.- Jong-Sen, Lee
Digital Image Smoothing and the Sigma Filter
Computer Graphics Image Processing, 1981
- 21.- Sabins, Floyd F. Jr.
Remote Sensing
Principles and Interpretation, 1974
- 22.- Papoulis
Fourier Transform and Applications
Prentice Hall, 1968
- 23.- Lira, Jorge
La Percepción Remota, Nuestros Ojos desde el Espacio
Serie La Ciencia desde Mexico
Fondo de Cultura Económica, 1987.