

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**TÉCNICAS DE FUSIÓN DE MÚLTIPLES SENSORES APLICADOS A
TELEDETECCIÓN**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADO POR:

CÉSAR FERNANDO HUAMANÍ AYALA

PROMOCIÓN

2004 – I

LIMA – PERU

2011

**TÉCNICAS DE FUSIÓN DE MÚLTIPLES SENSORES APLICADO A
TELEDETECCIÓN**

Agradezco a Jehová Dios por darme la fortaleza para seguir adelante y a mis padres, Rosa Amelia y Fernando por su apoyo incondicional.

Dedico este trabajo a mis hermanos, a mi sobrina Amelia y a mis amigos Percy Taipe C. y Víctor Pahuacho G. por sus aportes a este informe.

SUMARIO

Las técnicas de fusión de datos surgen como una solución al problema de combinar de forma óptima múltiples fuentes de información redundantes; de esta manera, representan una alternativa que mejora los sistemas basados en una sola fuente de información.

Por ello, las técnicas de fusión de datos en teledetección son de utilidad el ordenamiento territorial del Estado Peruano, administrador de una extensa región caracterizada por una riqueza geográfica y climática, y con diversidad de recursos (flora, fauna, minerales, hidrocarburos).

En este panorama, en el presente trabajo se estudia y analizan las técnicas de fusión de múltiples sensores; complementariamente, para la comprensión de la utilidad de la fusión de datos, se expone una aplicación de teledetección (análisis geográfico) la cual tiene como sensores aquellos situados en los satélites.

El informe está complementado con teoría sobre los sensores generales y aquellos relacionados con la teledetección. Estos últimos proporcionan diversa información dependiendo del espectro que detectan. Algunos espectros relacionados con agua, vegetación, minerales, etc.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I	
PLANTEAMIENTO DEL INFORME	2
1.1. Objetivo del estudio.....	2
1.2. Alcance	2
1.3. Contenido.....	2
CAPITULO II	
SENSORES	3
2.1 Clasificación	3
2.1.1 Sensores activos y pasivos	3
2.1.2 Sensores absolutos y relativos	4
2.1.3 Sensores según sus propiedades	4
2.2 Características y principios físicos.....	7
2.2.1 Características	7
2.2.2 Principios físicos	8
2.2.3 Ejemplos de sensores	10
2.2.4 Sensores, su interacción con el mundo	13
2.3 Sensores Remotos (Teledetección)	13
2.3.1 Generalidades de los sensores remotos	13
2.3.2 Naturaleza de los detectores.....	15
2.3.3 Sensores de bandas espectrales LANDSAT TM y SPOT HRVIR.....	16
2.3.4 Bandas Espectrales de LANDSAT TM y SPOT HRVIR.....	17
2.3.5 Resolución de un sensor.....	18
2.3.6 Relación entre los diferentes tipos de resolución.....	22
CAPITULO III	
FUSIÓN DE DATOS DE MÚLTIPLES SENSORES	23
3.1 Generalidades.....	23
3.1.1 Ventajas y limitaciones de la fusión de datos de múltiples sensores	24
3.1.2 Configuración de múltiples sensores.....	26
3.1.3 Procesamiento sensorial	27
3.1.4 Tipos de fusión sensorial.....	28
3.2 Niveles de Fusión.....	31

3.2.1	Nivel 0: Pre-proceso de las fuentes	32
3.2.2	Nivel 1: Evaluación del objeto	32
3.2.3	Nivel 2: Evaluación de la situación	33
3.2.4	Nivel 3: Evaluación del futuro	33
3.2.5	Nivel 4: Proceso refinamiento.....	33
3.2.6	Nivel 5: Refinamiento cognitivo	34
3.2.7	La gestión de la base de datos.....	34
3.2.8	Interacción de la persona con el ordenador.....	34
3.3	Técnicas de Fusión	34
3.3.1	Clasificación según su comportamiento	35
3.3.2	Clasificación según la lógica matemática	36
3.3.3	Descripción de las técnicas más utilizadas.....	37
3.4	Fusión de datos en teledetección	44
3.4.1	Aplicaciones de la fusión de datos	45
3.4.2	El método de fusión de datos mediante entropía (EDF)	46
CAPITULO IV		
APLICACIÓN DE LA FUSIÓN DE DATOS EN TELEDETECCIÓN		50
4.1	Descripción de los sensores utilizados.....	50
4.1.1	Sensor IRS – 1D pancromático	50
4.1.2	Sensor TM (Thematic Mapper).....	52
4.1.3	Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)	53
4.2	Ordenación territorial basado en Teledetección	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		57
ANEXO A		
GLOSARIO DE TÉRMINOS		58
BIBLIOGRAFÍA.....		60

INTRODUCCIÓN

Diversas aplicaciones de las técnicas de fusión de datos están relacionadas al control y automatización de pequeñas plantas, aplicaciones militares, aeroespaciales, medicina, y aplicaciones de la vida diaria.

La fusión de datos pretende obtener un resultado de mejor calidad, a partir de múltiples sensores, eventualmente heterogéneos, realizando inferencias que pueden no ser posibles a partir de uno solo.

En este informe de suficiencia se da a conocer los aspectos esenciales de la fusión de datos, describiendo algunas de ellas. Las aplicaciones usadas como estudio de caso para ilustrar los beneficios de la fusión de datos están orientadas a la teledetección. La teledetección consiste en la adquisición de información de un objeto o fenómeno, ya sea mediante la utilización de instrumentos de grabación o instrumentos de escaneo inalámbricos en tiempo real. Respecto a este campo, se puede afirmar que las técnicas de fusión de datos en teledetección presentan un desarrollo avanzado, que permite que sean utilizadas en análisis geográfico, además la fusión de datos mejora la percepción de los fenómenos oceanográficos, y permite realizar una mejor vigilancia marítima, integrando de forma simultánea las capacidades de los radares y las estaciones de rastreo de embarcaciones. Para la teoría de fusión de datos se considera sensor a todo elemento con capacidad de proporcionar información.

Para el propósito de estudio y análisis, este informe de suficiencia está dividido en cuatro capítulos, conclusiones y un anexo:

Capítulo 1.- Se refiere al planteamiento del informe, explicando los objetivos, el alcance y su contenido (bases bibliográficas).

Capítulo 2.- Se refiere a la descripción general sobre los sensores, su clasificación, características, principios físicos y ejemplo de sensores.

Capítulo 3.- Se refiere a la presentación de las bases teóricas conceptuales relacionadas a la fusión de datos de múltiples sensores. Se exponen las ventajas y limitaciones de la fusión de datos de múltiples sensores, los niveles de fusión y las técnicas de fusión.

Capítulo 4.- Se refiere a la presentación de un estudio de caso de una aplicación de la fusión de datos orientada al análisis geográfico.

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL INFORME

El presente capítulo describe el propósito del Informe de Suficiencia.

1.1 Objetivo del estudio

Se establecieron dos objetivos:

- Estudiar y analizar las técnicas de fusión de datos de múltiples sensores.
- Comprender la utilidad de los sensores inteligentes en la teledetección.

1.2 Alcance

Las técnicas de fusión de múltiples sensores serán analizadas para el uso de sensores utilizados en los satélites para la teledetección.

1.3 Contenido

Se verá preliminarmente el estudio de los sensores. Posteriormente se hace el análisis de la fusión de datos de múltiples sensores, explicando primeramente las generalidades [1] [2], y se presentan las ventajas y limitaciones de la fusión de datos de múltiples sensores y otros aspectos tales como la configuración de múltiples sensores, procesamiento sensorial y tipos de fusión sensorial. Así mismo se resumen los niveles de fusión [3] (Pre-proceso de las fuentes, evaluación del objeto, evaluación de la situación, evaluación del futuro, proceso refinamiento, refinamiento cognitivo)

Así también, se analizan las técnicas de fusión, ilustrando su clasificación según su comportamiento y según su lógica matemática, para luego hacer la descripción de las técnicas más utilizadas (Bayes, Dempster-Shafer, conjuntos difusos, inteligencia artificial).

Finalmente, en este trabajo se presentará una aplicación de fusión de datos que utiliza la técnica de fusión de datos por entropía (EDF: Entropy Data Fusión, por sus siglas en inglés).

CAPÍTULO II SENSORES

Un sensor es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas. Las variables de instrumentación son dependientes del tipo de sensor y pueden ser: temperatura, intensidad lumínica, distancia, aceleración, inclinación, desplazamiento, presión, fuerza, torsión, humedad, pH, y otros estados físicos o químicos.

En general, para la teoría de fusión de datos, todo elemento capaz de proporcionar datos es considerado un sensor. Por ejemplo, un radar capaz de detectar la ubicación de un buque es un sensor, del mismo modo un sistema que recopile las datos (rumbo, posición y velocidad) enviados por los buques. También es considerado sensor (sensor remoto) aquel situado en un satélite y que permite capturar un conjunto de píxeles para un rango de longitud de onda, caracterizando temperatura, flora, minerales, etc.

2.1 Clasificación

Los sensores pueden tener una clasificación desde una definición muy simple hasta lo más complejo. Dependiendo de la finalidad de uso, se pueden obtener diferentes criterios de clasificación. En este sentido, se menciona a continuación algunos criterios para clasificar los sensores.

2.1.1 Sensores activos y pasivos

Dependiendo de la fuente de radiación incidente en el sensor. Estos se pueden clasificar en dos categorías: *activos* y *pasivos*.

a. Sensor pasivo

No necesita una fuente de energía adicional y de manera directa genera la señal eléctrica en respuesta a un estímulo externo; es decir, la energía del estímulo es convertida por el sensor en la señal de salida. Ejemplos de ello son la termocupla, el fotodiodo, y el sensor piezoeléctrico. La mayoría de sensores pasivos son sensores directos.

b. Sensor activo

Requiere de una fuente de energía externa para su operación, la cual es llamada señal de excitación. Esta señal es modificada por el sensor para producir la señal de salida. Los sensores activos algunas veces son llamados paramétricos debido a que sus

propiedades cambian en respuesta a un efecto externo y esas propiedades pueden ser subsecuentemente convertidas en señales eléctricas [5]. Se puede indicar que los parámetros del sensor modulan la señal de excitación y que la modulación posee información del valor medido. Por ejemplo, un termistor es un resistor sensible a la temperatura. No genera señal eléctrica, sin embargo al pasar una corriente eléctrica su resistencia puede ser medida al detectar variaciones de voltaje o corriente a través del termistor. Esas variaciones (en ohmios) relacionan directamente a la temperatura mediante una función conocida. Otro ejemplo de un sensor activo es el tensiómetro resistivo en el cual la resistencia eléctrica se relaciona al esfuerzo. Para medir la resistencia del sensor, una corriente eléctrica debe ser aplicada desde una fuente externa.

2.1.2 Sensores absolutos y relativos

Dependiendo de la referencia seleccionada, los sensores pueden ser clasificados en absolutos y relativos.

a. Sensor absoluto

Detecta un estímulo en referencia a una escala física absoluta que es independiente de las condiciones de medición. Por ejemplo, los termoresistores son resistencias que modifican su valor en relación con la temperatura a la que estén expuestas. Son sensores absolutos, es decir miden la temperatura respecto a 0° Kelvin. Entre estos tipos de sensores se tiene a los PTC y NTC. Los PTC (Positive Temperature Coefficient) incrementan el valor de su resistencia al incrementarse la temperatura y los NTC (Negative Temperature Coefficient) disminuyen su valor resistivo al aumentar la temperatura. [5]

b. Sensor relativo

Produce una señal que necesariamente debe tener un valor de referencia. Por ejemplo, la termocupla produce un voltaje eléctrico que es función del gradiente de temperatura a través de la termocupla. De este modo, la señal de salida de la termocupla no puede ser relacionada a ninguna temperatura en particular sin tener como referencia a un punto de referencia conocido. Un sensor de presión relativo produce una señal respecto a un umbral de referencia que no es la presión cero, (por ejemplo la presión atmosférica).

2.1.3 Sensores según sus propiedades

Otra forma de clasificar a los sensores es considerando todas sus propiedades, tales como lo que mide estímulo (Tabla 2.1), sus especificaciones (Tabla 2.2), el fenómeno físico al cual es sensible (Tabla 2.3), el mecanismo de conversión utilizado (Tabla 2.4), el material con el que es fabricado (Tabla 2.5), y su campo de aplicación (Tabla 2.6).

Tabla 2.1 Estímulos y datos medidos

Tipo	Datos medidos
Acústico	Polarización, fase y amplitud de onda, espectro, velocidad de onda
Biológico	Biomasa
Químico	Biomasa (tipo, concentración)
Eléctrico	Carga, corriente, potencia, voltaje, campo eléctrico (amplitud, fase, polarización, espectro), conductividad, permitividad,
Magnético	Campo magnético (amplitud, fase, polarización, espectro), flujo magnético, permeabilidad.
Óptico	Amplitud, fase, polarización, espectro y velocidad de la onda, índice de refracción, emisividad, reflectividad, absorción.
Mecánico	Posición (lineal, angular), aceleración, fuerza, estrés, presión, masa, densidad, tensión, momento, torque, velocidad de flujo, forma, rugosidad, orientación, rigidez, etc.
Viscoso	Cristalinidad, integridad estructural
Radiactivo	Tipo, energía, intensidad,
Térmico	Temperatura, flujo, calor específico, conductividad térmica

Tabla 2.2 Especificaciones

Sensibilidad
Rango de estímulo
Estabilidad (corto y largo plazo)
Resolución
Precisión
Selectividad
Velocidad de respuesta
Condiciones ambientales, características de sobre carga
Linealidad
Histéresis
Dead band (Zona neutral, sin respuesta)
Tiempo de vida en operación
Formato de salida
Costo, tamaño, peso
Otros.

Tabla 2.3 Medio de detección del sensor

Biológico Químico Onda eléctrica, magnética, o electromagnética Calor, temperatura Desplazamiento mecánica u onda Radioactividad, radiación Otras.
--

Tabla 2.4 Fenómeno de conversión

Físico	Químico	Biológico
Termoeléctrico	Transformación química	Transformación bioquímica
Fotoeléctrico	Transformación física	Transformación física
Fotomagnético	Proceso electroquímico	Espectroscopía
Magnetoeléctrico	Espectroscopía	Efecto en organismo de prueba
Electromagnético	Otras	Otras
Termoelástico		
Electroelástico		
Termomagnético		
Termoóptico		
Fotoelástico		
Otros		

Tabla 2.5 Material del sensor

Inorgánica	Orgánica
Conductor	Aislador
Semiconductor	Líquido, gas o plasma
Sustancia biológica	Otra

Tabla 2.6 Campo de aplicación

Agricultura	Automotriz
Ingeniería civil, construcción	Doméstica, electrodomésticos
Distribución, comercio, finanzas	Medio ambiente, meteorología , seguridad
Energía, potencia	Información, telecomunicación
Salud, medicina	Marina
Fabricación	Recreación, juguetes
Militar	Espacial
Medición científica	Otros
Transporte	

Si se toma por ejemplo a un acelerómetro oscilador de onda acústica superficial, sus datos podrían ser los siguientes:

Estímulo: Aceleración

Especificaciones: Sensibilidad en desplazamiento de frecuencia por gramo de aceleración.

Estabilidad de corto y largo plazo en Hz por unidad de tiempo, etc.

Medio de detección: Mecánico.

Fenómeno de conversión: Elastoeléctrico.

Material: aislante inorgánico.

Campo: Automotriz, marino, espacial, y medición científica.

2.2 Características y principios físicos

En esta sección se verán las características y principios físicos más importantes de los sensores radar.

2.2.1 Características

Los productos más clásicos son las imágenes LANDSAT (TM y MSS) y las SPOT, las primeras han sido desarrolladas por la agencia espacial norteamericana, mientras que el proyecto SPOT está a cargo del CNES francés en colaboración con Bélgica y Suiza. A continuación se indican algunas características de cada una de ellas.

Landsat MSS

El sensor MSS es instalado sobre satélites Landsat. El campo total de visión del sensor abarca 11.56 grados, lo que supone cubrir una franja de terreno de 185 km. Una escena de este sensor contiene 2 340 líneas y 3 240 columnas, representando cada pixel superficies de 57x79 m.

Registra información en cuatro bandas del espectro:

banda 4: 0,5 – 0,6 mm: verde

banda 5: 0,6 – 0,7 mm: rojo

banda 6: 0,7 – 0,8 mm: infrarrojo próximo

banda 7: 0,8 – 1,1 mm: infrarrojo próximo

Landsat TM

El sensor TM (Thematic Mapper) es el sucesor en la serie Landsat del MSS. Supone grandes mejoras en las resoluciones espacial, espectral y radiométrica: de 79 a 39 metros, de 4 a 7 bandas y de 6 a 8 bits (actualmente las imágenes MSS también se codifican en 8 bits). La resolución espectral del sensor es:

banda 1: 0,45 – 0,52 mm: azul

banda 2: 0,52 – 0,60 mm: verde

banda 3: 0,63 – 0,69 mm: rojo

- banda 4: 0,76 – 0,90 mm: infrarrojo próximo
- banda 5: 1,55 – 1,75 mm: infrarrojo medio
- banda 6: 10,40 – 12,50 mm: infrarrojo térmico
- banda 7: 2,08 – 2,35 mm: infrarrojo medio
- La banda 6 tiene una resolución espacial de 120 m.

SPOT

El sistema de exploración instalado en esta plataforma se denomina HRV y permite dos modos de captura de la información: pancromático y multibanda con unas resoluciones espaciales de 20 y 10 m, respectivamente. El área cubierta por cada escena es de 60x60 km. Es sensible en las siguientes bandas del espectro:

- multibanda XS1: 0,5 – 0,59 mm: verde
- multibanda XS2: 0,61 – 0,68 mm: rojo
- multibanda XS3: 0,79 – 0,89 mm: infrarrojo próximo
- pancromático PAN: 0,51 – 0,73 mm: parte del visible

Una importante novedad del sistema es su capacidad para variar el ángulo de observación, lo que le permite observar la misma zona en pasadas sucesivas, de modo que entre dos imágenes de la misma zona tomadas en pasadas consecutivas tengan una zona común y permitan la visión estereoscópica, lo que permitiría crear un modelo digital del terreno.

2.2.2 Principios físicos

A continuación se mencionan los principios físicos básicos de los sensores radar.

Reflexión de las ondas

Cuando una onda electromagnética incide sobre un objeto sólido en el aire o el vacío se produce una dispersión de las ondas de radio tal como ocurre con las del radar. Esto ocurre sobretudo en el caso de los materiales conductores como el metal y la fibra de carbono, lo que hace que el radar sea el más indicado para la detección de aeronaves. En algunos casos los aviones militares utilizan materiales con sustancias resistivas y magnéticas que absorben las ondas del radar, disminuyendo así el nivel de reflexión.

La reflexión de las ondas del radar cambia dependiendo de su longitud de onda y de la forma del blanco. Si la longitud de onda es mucho menor que el tamaño del blanco, la onda rebotará del mismo modo que la luz contra un espejo, sin embargo si la longitud de onda es mucho más grande que el tamaño del blanco, lo que ocurre es que este se polariza (separación física de las cargas positivas y negativas) como en un dipolo. Antiguamente se utilizaban longitudes de onda muy elevadas, mayores que los objetivos; como consecuencia de ello las señales que recibían eran tenues. En la actualidad los radares emplean longitudes de onda más pequeñas (de pocos centímetros o inferiores) lo

que permiten detectar objetos del tamaño de una barra de pan.

Las señales de radio de onda corta (3 kHz - 30 MHz) se reflejan en las curvas y aristas, de igual manera que la luz produce destellos en un trozo de cristal curvo. Para estas longitudes de onda los objetos que más reflejan son aquellos con ángulos de 90° entre las superficies reflectivas. Una estructura que conste de tres superficies que se juntan en una esquina (como la de una caja) siempre reflejará hacia el emisor aquellas ondas que entren por su abertura; este tipo de reflectores son denominados reflectores de esquina (Figura 2.1) normalmente usados para lograr visualizar objetos que en otras circunstancias no sería posible (se acostumbra instalarlos en barcos para mejorar su detectabilidad y así evitar colisiones)

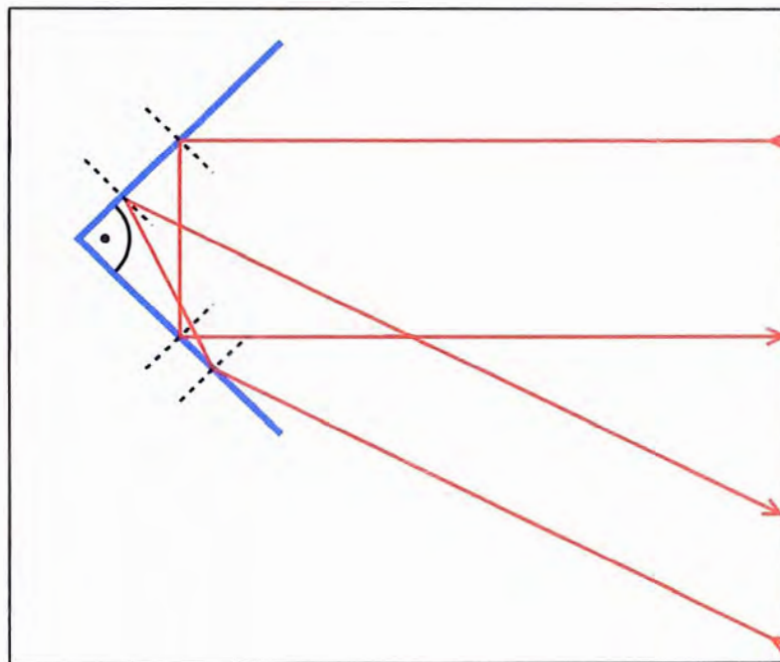


Figura 2.1 Reflector de esquina

Potencia del radar

La potencia P_r reflejada a la antena de recepción está dada por la ecuación radar:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \quad (2.1)$$

donde

- P_t = potencia transmitida.
- G_t = ganancia de la antena de transmisión.
- A_r = apertura efectiva (área) de la antena de recepción.
- σ = sección transversal del radar, o coeficiente de decaimiento del objetivo.
- F = factor de propagación del patrón.
- R_t = distancia del transmisor al objetivo.
- R_r = distancia del objetivo al receptor.

En el caso de que el transmisor y el receptor se encuentren en el mismo lugar se tendría que $R_t = R_r$ y el término $R_t^2 R_r^2$ puede ser reemplazado por R^4 , donde R es la distancia, obteniéndose la siguiente expresión:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 R^4} \quad (2.2)$$

Esto significa que la potencia en el receptor disminuye proporcionalmente a la cuarta potencia de la distancia, lo que quiere decir que la potencia reflejada desde el objetivo distante es muy pequeña.

La ecuación (2.2) con $F = 1$ es una simplificación para el vacío sin interferencia. En una situación real los efectos de atenuación en el recorrido deben ser considerados.

Polarización

El campo eléctrico de la señal que emite un radar es perpendicular a la dirección de propagación. La dirección de dicho campo determina la polarización de la onda. Los radares usan polarizaciones horizontales, verticales, lineales o circulares, en función de la aplicación. Por ejemplo, la polarización circular es adecuada para minimizar la interferencia causada por la lluvia (sin embargo debe evitarse para radares meteorológicos que lo que buscan es cuantificar las precipitaciones). La lineal permite detectar superficies de metal. La polarización aleatoria es adecuada para detectar superficies irregulares como rocas y se usa en radares de navegación.

Interferencias

Los sistemas radar deben hacer frente a la presencia de variados tipos de señales no deseadas y conseguir centrarse en la señal que realmente interesa. Dichas señales indeseables se pueden originar en fuentes tanto internas como externas y pueden ser de naturaleza pasiva o activa. La capacidad del sistema radar de sobreponerse a la presencia de estas señales define su relación señal/ruido (SNR). Cuanto mayor sea la relación SNR del sistema, se podrá aislar con facilidad los objetivos reales de las señales de ruido del entorno. Entre las interferencias que se pueden presentar se tiene el ruido, clutter (señales de RF recibidos por el radar creando blancos fantasmas), jamming (señales externas al sistema radar emitidas en las frecuencias de funcionamiento del mismo y que por tanto enmascaran los objetivos de interés)

2.2.3 Ejemplos de sensores

Se puede mencionar y describir los siguientes:

a. Sensores de caudal de aire

Los sensores de caudal recogen las velocidades del flujo de aire o líquidos. Los sensores de caudal usan diferentes principios de medición, para líquidos funcionan por ejemplo sobre la base de ultrasonidos, esta medición sin contacto tiene la ventaja que los

sensores no están expuestos a golpes de ariete y medios sólidos. Por otro lado, los sensores de caudal son utilizados en el sector de calefacción, ventilación y climatización para el análisis de la velocidad del aire. Mediciones que usan el principio manométrico de una película térmica permiten trabajar en un amplio rango de temperatura y caudal. Por ejemplo, los sensores de caudal de la serie EE 75 (Figura 2.2) permiten determinar la velocidad del aire hasta 40 m/s con temperaturas hasta 120°. Estos sensores de medición se pueden montar en conductos de ventilación. Otra manera de medir los canales de velocidad del aire es a través de sensores en cruz, estos tienen como señal de salida una presión diferencial, que es proporcional a la velocidad del flujo de aire. Con la ayuda de las unidades de análisis conectadas (sensores de presión diferencial) permite calcular la velocidad del flujo de aire y el volumen de flujo. Debido a que muy a menudo es necesario el análisis de la velocidad del aire, existen en la práctica muchos otros métodos de medición.

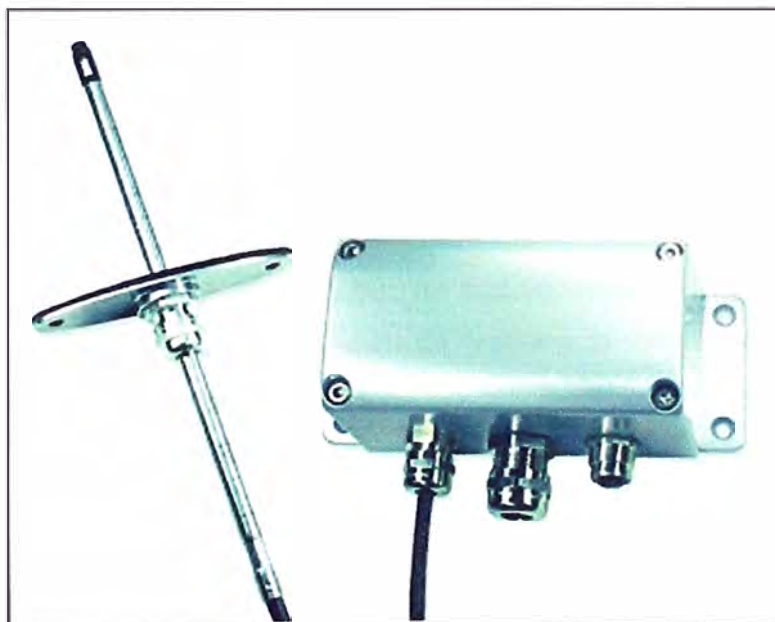


Figura 2.2 Transductor de velocidad y caudal del aire EE 75

b. Sensores de corriente

Los sensores de corriente monitorizan corriente continua o alterna. Se incluyen sensores de corriente lineales ajustables, de balance nulo, digitales y lineales. Los sensores de corriente digitales pueden hacer sonar una alarma, arranca un motor, abrir una válvula o desconectar una bomba. La señal lineal duplica la forma de la onda de la corriente captada, y puede ser utilizada como un elemento de respuesta para controlar un motor o regular la cantidad de trabajo que realiza una maquina.

c. Sensores de efecto Hall

Son semiconductores y son ampliamente utilizados en codificadores ("encoders") de servomecanismos.

d. Sensores de humedad

Los sensores de humedad relativa/temperatura y humedad relativa están configurados con circuitos integrados que proporcionan una señal acondicionada. Estos sensores contienen un elemento sensible capacitivo en base de polímeros que interacciona con electrodos de platino. Están calibrados por láser y tienen una intercambiabilidad de +5% HR (humedad relativa), con un rendimiento estable y baja de desviación.

e. Sensores de posición de estado sólido

Los sensores de posición de estado sólido, detectores de proximidad de metales y de corriente, se encuentran disponibles en varios tamaños y terminaciones. Estos sensores combinan fiabilidad, velocidad, durabilidad y compatibilidad con diversos circuitos electrónicos para aportar soluciones a las necesidades de aplicación.

f. Sensores de presión y fuerza

Los sensores de presión son pequeños, fiables y de bajo costo. Ofrecen una excelente repetitividad y una alta precisión y fiabilidad bajo condiciones ambientales variables. Además, presentan unas características operativas constantes en todas las unidades y una intercambiabilidad sin recalibración.

g. Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura se catalogan en dos series diferentes: TD y HEL/HRTS. Estos sensores consisten en una fina película de resistencia variable con la temperatura (RTD) y están calibrados por láser para una mayor precisión e intercambiabilidad. Las salidas lineales son estables y rápidas.

h. Sensores de turbidez

Los sensores de turbidez aportan una información rápida y práctica de la cantidad relativa de sólidos suspendidos en el agua u otros líquidos. La medición de la conductividad da una medición relativa de la concentración iónica de un líquido dado.

i. Sensores reed

Los sensores magnéticos también se les denominan relés tipo "reed", son utilizados en cilindros neumáticos para detectar la posición de fin de carrera a través del vástago del cilindro. Entre las aplicaciones se incluyen brújulas, controles remotos de vehículos, detección de vehículos, control de cadenas transportadoras, sensores de posición, sistemas de seguridad e instrumentación médica.

j. Sensores de presión

Los sensores de presión están basados en tecnología piezoresistiva, combinada con microcontroladores que proporcionan una alta precisión, independiente de la temperatura, y capacidad de comunicación digital directa con PC. Las aplicaciones afines

de estos productos incluyen instrumentos para aviación, laboratorios, controles de quemadores y calderas, comprobación de motores, tratamientos de aguas residuales y sistemas de frenado.

2.2.4 Sensores, su interacción con el mundo

Las aplicaciones requieren de la recopilación de información. Esta información es procesada para luego tomar una decisión, es decir, saber de qué manera se actuará. (Figura 2.3)

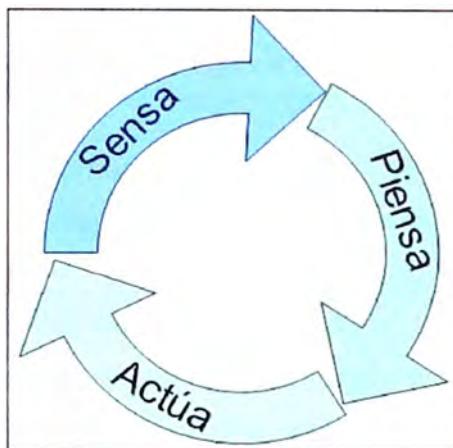


Figura 2.3 Procesos en una aplicación robótica

La aplicación debe por lo tanto interactuar con el mundo real recogiendo información pertinente. A continuación se mencionan los principios de teledetección en donde los detectores son conocidos como sensores remotos.

2.3 Sensores remotos (teledetección)

La presente sección está relacionada directamente con el caso de estudio del informe.

2.3.1 Generalidades de los sensores remotos

La radiación electromagnética es portadora de la información acerca de aquellos materiales u objetos de interés en percepción remota. Sin embargo, para adquirir y luego poder procesar dicha información son necesarios ciertos dispositivos denominados sensores.

Esta sección se enfoca fundamentalmente en los llamados espectroradiómetros de barrido (scanning radiometers) de particular importancia en sistemas de percepción remota. En la gran mayoría de estos instrumentos el mecanismo de base es el efecto fotoeléctrico: cuando un haz de fotones incide sobre una placa negativamente cargada o sobre algún material fotosensible adecuado se produce una emisión de partículas negativas (electrones). Estos electrones pueden fluir desde la placa generando una señal electrónica. La magnitud de la corriente eléctrica producida (número de fotoelectrones por unidad de tiempo) es directamente proporcional a la intensidad luminosa.

La energía cinética de los fotoelectrones emitidos varía con la longitud de onda asociada a los fotones incidentes. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que diferentes materiales que manifiestan el fenómeno fotoeléctrico liberan fotoelectrones bajo diferentes intervalos de longitudes de onda: cada uno de ellos presenta un umbral de longitudes de onda para el que el fenómeno se manifiesta y otro umbral de longitudes de onda para el que el fenómeno cesa. Los sensores que interesan para el caso de estudio son del tipo pasivo, en donde la radiación que llega a ellos proviene de una fuente externa (por ejemplo, el Sol). Además, los electrones liberados son capaces de inducir la formación de una imagen cuando son recogidos por dispositivos adecuados de detección (detectores).

Como los sensores son instrumentos capaces de medir cuantitativamente la radiación electromagnética en determinadas regiones del espectro se denominan radiómetros. Cuando este sensor incluye además un componente del tipo de un prisma o red de difracción o filtros de interferencia que pueden dispersar la radiación de una dada región del espectro en longitudes de onda discretas que son dirigidas hacia los detectores se denomina espectrómetro. Cuando la radiación es dispersada no en longitudes de onda discretas sino en bandas espectrales más anchas, es decir cubriendo ciertos intervalos de longitudes de onda el término más conveniente para el sensor es espectroradiómetro. Este es el caso más usual en los sensores aeroespaciales. Como en general estos sensores se desplazan barriendo la escena estática que están observando se dice que operan en modo de barrido o escaneado (scanning mode). Se puede distinguir dos categorías de estos escáneres: los óptico-mecánicos y los óptico-electrónicos.

Los primeros se caracterizan por tener un componente mecánico, p.ej. un espejo rotativo que opera en el barrido de la escena, mientras que los segundos el mismo sistema óptico enfoca la radiación sobre un arreglo lineal de detectores. Otra característica que conviene distinguir en los sensores remotos es la manera como ellos registran la información a medida que avanzan según su trayectoria u órbita. En general el área barrida se extiende a ambos lados de la trayectoria (swath width) y su anchura queda determinada por la óptica del sistema por ejemplo por el telescopio que debe llevar el sistema para observaciones desde cientos de kilómetros de altura y determina el campo de visión (Field of View o FOV) Una opción de barrido (escaneado por trayectorias) se esquematiza en la Figura 2.4, esta barre la escena a lo largo de una línea simple (o múltiple) transversal a la trayectoria. Esta línea es muy larga (kilómetros) sin embargo muy angosta (metros). Cada línea se subdivide en una secuencia de elementos espaciales individuales, cada una de las cuales representa una pequeña área de la escena terrestre que se examina. Para este tipo de barrido existe un arreglo lineal de

pequeños detectores cuyas minúsculas dimensiones permiten que se asocien hasta miles de ellos en dicho arreglo.

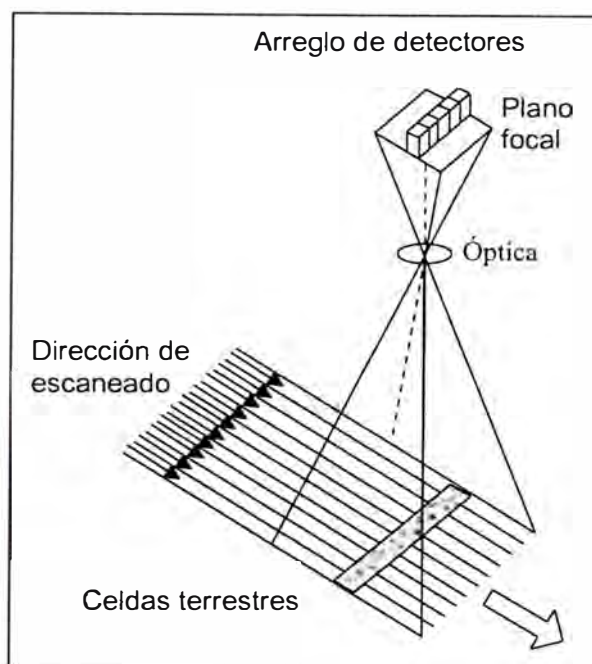


Figura 2.4 Escaneado según trayectorias (along track pushbroom)

El sistema de filtros incorporado al arreglo permite seleccionar las longitudes de onda. Cada detector es un dispositivo de acoplamiento de carga (Charge – Coupled Device – CCD). En este modo de barrido, los píxeles que constituirán la imagen final corresponden a estos microdetectores con sus correspondientes filtros incorporados en el arreglo lineal.

A medida que la plataforma avanza en su órbita la radiación proveniente de las celdas terrestres a lo largo del campo de visión del satélite llega simultáneamente a los correspondientes detectores. La señal generada por cada detector es removida en milisegundos, siendo el detector reseteado a cero quedando listo para recibir la radiación proveniente de la nueva línea del campo de visión.

2.3.2 Naturaleza de los detectores

En los primeros tiempos de la percepción remota los detectores eran del tipo de los fotomultiplicadores. Actualmente la mayoría de los detectores son de estado sólido, constituido por aleaciones o metales semiconductores. Estos poseen una conductividad eléctrica intermedia entre la de un metal y la de un aislador.

En condiciones normales (no excitados) estos semiconductores poseen sus electrones en un nivel de energía completo (desde el punto de vista de la configuración electrónica del modelo atómico mecánico cuántico). Bajo ciertas condiciones, como la interacción con fotones, electrones de dicho nivel son excitados a otro nivel denominado banda de conducción. La resistencia a esta transferencia varía inversamente al número

de fotones incidentes. Diferentes materiales responden de distinta manera a las diferentes longitudes de onda (es decir, a la energía de los fotones), lo que los hace espectralmente selectivos.

Es así que para la región visible se utilizan fotodiodos de silicio y de PbO (óxido de plomo), en el infrarrojo cercano PbS (sulfuro de plomo) e In – As (indio – arsénico), en el infrarrojo medio (3 – 6 μm) InSb (indioantimonio) y en el infrarrojo térmico (8 –14 μm) Hg – Cd – Te (mercurio – cadmio – telurio). Estos últimos deben ser enfriados a muy bajas temperaturas para optimizar la eficiencia de la emisión electrónica. Uno de los dispositivos que en los últimos tiempos ha adquirido gran importancia es el detector de acoplamiento de carga (charge – coupled device – CCD).

Un CCD está formado por un material fotosensible embebido en un chip de silicio. Se genera en éste un pozo de potencial que recibe los electrones liberados por los fotones incidentes en el chip posteriormente a su enfoque y filtración por el sistema óptico. Los componentes fotosensibles del chip pueden llegar a ser muy pequeños, del orden de 1 μm de diámetro. Estos elementos pueden ser interconectados a través de microcircuitos para formar arreglos lineales o bidimensionales. Puede llegar a prepararse arreglos lineales desde 2 cm de longitud con hasta 1000 detectores individuales.

2.3.3 Sensores de bandas espectrales LANDSAT TM y SPOT HRVIR

Para profundizar el estudio de los mecanismos de recolección de datos por percepción remota se usa como ejemplos típicos los casos de dos plataformas clásicas cuyas respectivas familias han contribuido y siguen contribuyendo decisivamente a las aplicaciones prácticas de esta disciplina: LANDSAT y SPOT. El primer caso es un ejemplo típico del modo cruzado y el segundo de trayectoria.

El sensor del LANDSAT está diseñado para tomar imágenes en el nadir (Término astronómico que describe el punto de la esfera celeste diametralmente opuesto al cenit.), es decir imágenes de áreas terrestres ubicadas directamente por debajo del sensor. El escaneado lo realiza un espejo oscilante bidireccional que permite un ancho de barrido de 185 km. Un telescopio dirige la radiación hacia un corrector de las líneas barrido (SLC – scan lines corrector). Este último es necesario para corregir el efecto acumulado del desplazamiento del satélite en su órbita y el barrido cruzado realizado por el espejo. El SLC es un sistema de espejos que rota perpendicularmente al espejo de barrido y compensa el efecto orbital. Los detectores para visible e infrarrojo cercano son de silicio organizados en 4 líneas de 16 detectores cada uno. Para las bandas 5 y 7 (Infrarrojo medio) los detectores son de antimonio de indio organizados cada uno en líneas de 16 detectores. Por su parte el detector de infrarrojo térmico es un arreglo de cuatro detectores de telurio de cadmio y mercurio. El IFOV (instantaneous field of view) del

sensor es de 30x30 m para las bandas 1 – 5 y 7, y de 120x120 m para la banda infrarroja térmica. En el ETM+ del Landsat – 7 este último valor ha sido mejorado a 60x60 m.

La familia SPOT se caracteriza por el sistema de barrido de trayectoria. Los sensores de estos satélites HRV (High Resolution Visible) para 1, 2 y 3 y HRVIR (High Resolution Visible Infrared) para 4 y 5 se caracterizan por estar duplicados en cada satélite y por permitir la orientación independiente para efectuar observaciones con distintos ángulos.

La radiación reflejada desde el terreno entra al HRV o HRVIR vía un espejo plano y un telescopio la proyecta sobre dos arreglos CCD de 6000 detectores cada uno dispuestos linealmente. Cuando los dos instrumentos “miran” directamente el terreno debajo del sensor se pueden disponer de modo de cubrir franjas adyacentes, con un campo de visión total de 117 km y una sobreposición de 3 km. Sin embargo, es también posible seleccionar desde la estación operadora terrestre ángulos de observación fuera del nadir.

De esta manera es posible observar desde una posición centrada en la proyección terrestre de la trayectoria del satélite cualquier región de interés dentro de una franja terrestre de 950 km. Esto hace que, pese a que el satélite tiene un período de revisita de 26 días, puede observar una misma área en intervalos de 4 o 5 días en pasajes por órbitas cercanas realizando observación oblicua.

También pueden realizarse observaciones en pasajes en días sucesivos de modo que las dos imágenes sean adquiridas según ángulos a ambos lados de la vertical. Se obtienen así imágenes para medidas topográficas.

2.3.4 Bandas Espectrales de LANDSAT TM y SPOT HRVIR.

La Tabla 2.7 contiene los rangos de longitudes de onda abarcados por las bandas espectrales de estos satélites. Las principales aplicaciones de las bandas del LANDSAT TM (y por similitud de rangos espectrales también las del SPOT) son las siguientes:

Banda 1 (0.45 – 0.52 μ m) (azul): buena penetración en cuerpos de agua. Diferenciación de suelos y vegetación y de coníferas con vegetación de hojas caducas.

Banda 2 (0.52 – 0.60 μ m) (verde): reflectancia en el verde para vegetación en buenas condiciones.

Banda 3 (0.63 – 0.69 μ m) (rojo): absorción de la clorofila. Diferenciación de especies vegetales.

Banda 4 (0.76 – 0.90 μ m) (infrarrojo cercano): evaluación de biomasa. Delineación de cuerpos de agua.

Banda 5 (1.55 – 1.75 μ m) (infrarrojo medio): estado hídrico en vegetales. Discriminación entre nubes, nieve y hielo

- Banda 6 (10.4 – 12.5 μm) (infrarrojo térmico): stress térmico en vegetales y mapeados térmicos.
- Banda 7 (2.08 – 2.35 μm) (infrarrojo medio): Estudios geológicos, identificación de zonas con alteraciones hidrotérmicas en rocas.

Tabla 2.7 Bandas espectrales del LANDSAT y HRVIR

TM Rango espectral (μm)	HRVIR Rango espectral (μm)
Banda 1 0.45 – 0.52	Banda 1 0.50 – 0.59
Banda 2 0.52 – 0.60	Banda 2 0.61 – 0.68
Banda 3 0.63 – 0.69	Banda 3 0.79 – 0.89
Banda 4 0.76 – 0.90	Banda 4 1.58 – 1.75
Banda 5 1.55 – 1.75	
Banda 6 10.4 – 12.5	
Banda 7 2.08 – 2.35	
IFOV Nadir 30x30m (b. 1 – 5, 7)	IFOV Nadir 20x20m 120x120m (b. 6)
Barrido 180 km	Barrido 60 km (c/instrumento)

2.3.5 Resolución de un sensor

Los sistemas de percepción remota difieren en la resolución, es decir, el nivel de detalle con que pueden capturar las imágenes, su frecuencia temporal, “finura espectral”, etc. Desde este punto de vista se consideran cuatro diferentes tipos de resoluciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal. El número de píxeles que integran un sensor de satélite o de cámara digital, definen su poder de resolución. Es decir la capacidad de discernir objetos o detalles de un determinado tamaño en las imágenes captadas. A mayor número de píxeles por unidad de superficie, mayor resolución del fotosensor, pero también mayor es el volumen del archivo informático generado. Es lo que se denomina resolución espacial y constituye uno de los tipos de resolución que definen a las imágenes satélites.

a. Resolución espacial:

Este concepto designa al objeto más minúsculo que puede ser ubicado sobre una imagen. En un sistema fotográfico, acostumbra cuantificarse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Esto se mide en mm sobre la foto o metros sobre el terreno, y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.

Por otro lado, en los sensores óptico – electrónicos, se prefiere utilizar el concepto de IFOV (campo de visión instantáneo) que se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un instante determinado. La relación entre IFOV y tamaño de

pixel (d) está dada por la expresión mostrada en la ecuación 2.3 (Figura 2.4). No obstante, se suele utilizar la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo, teniendo en cuenta la altura del vuelo y la velocidad de exploración del sensor. Simplificando las cosas, esa distancia se corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen (pixel).

$$d = 2H \tan\left(\frac{IFOV}{2}\right) \quad (2.3)$$

donde d es el tamaño del pixel y H la distancia del sensor a la superficie terrestre.

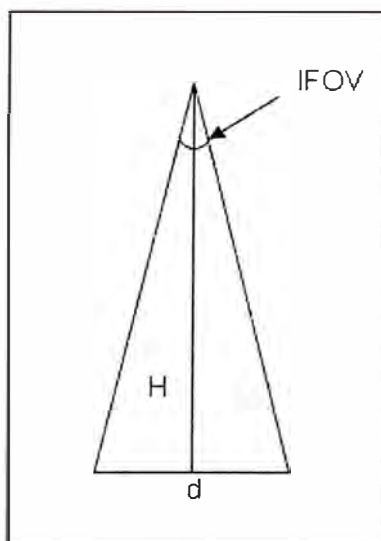


Figura 2.4 Relación IFOV – Tamaño de pixel

La resolución espacial en la superficie varía en función de la distancia del satélite y el ángulo de observación relativo a la vertical. De esta manera, la resolución en los extremos de una imagen puede ser varias veces mayor que la del nadir (punto de la superficie más cercano al satélite y que suele coincidir con el centro de la imagen) del satélite. Más aún, si bajo el satélite el IFOV es cuadrado, irá adquiriendo una forma rectangular hacia los extremos. Estos factores han de ser tenidos en cuenta para una interpretación correcta de los datos.

Cada problema tiene su resolución espacial más apropiada. Una resolución muy alta para el estudio de eventos mesoescalares sería claramente contraproducente y estudios de carácter urbano precisan de resoluciones de algunos metros.

Por ejemplo las imágenes Landsat TM, tienen una resolución espacial de 30x30 m en las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 y de 120x120 m en la 6 (térmica). El sensor SPOT - HRV tiene una resolución de 10x10 m, mientras que los satélites meteorológicos como NOAA, el píxel representan un tamaño desde 500 m a 1100 m de lado (Figura 2.5)

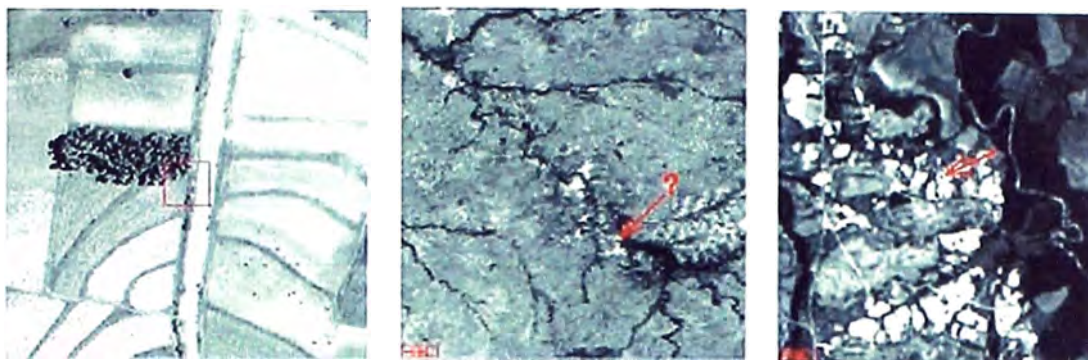


Figura 2.5 Tres resoluciones espaciales para una misma región (de lejos a cerca)

b. Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas. A la vez, conviene que esas bandas sean suficientemente estrechas con el objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés.

Por lo tanto, a menor ancho espectral mayor resolución. El problema que surge es que también se reduce la relación S/N por lo que es necesario llegar a una solución de compromiso entre ambas magnitudes.

Dependiendo del propósito del sensor, este factor tendrá más o menos importancia. La elección de un número apropiado de bandas y la correcta selección de su anchura pueden proporcionar ventajas a la hora de realizar clasificaciones entre cubiertas de respuesta espectral semejante. Por ejemplo el índice de vegetación procede de la relación entre las reflectividades en el infrarrojo cercano y en el rojo, y nos da una medida del vigor de la cubierta vegetal. Un ancho de banda inadecuada o la elección incorrecta del número y posición de las bandas conduce a pobres resultados.

Por ejemplo, un sensor de vegetación SPOT tiene una resolución espectral de 3, Landsat de 7. Los nuevos sensores, llamados también espectrómetros o hiperespectrales llegan a tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy estrecho (unos pocos nm) para poder separar de forma precisa distintos objetos por su comportamiento espectral (Figura 2.6).

c. Resolución radiométrica

La resolución o sensibilidad radiométrica hace referencia al rango dinámico o número de nivel digital usados al digitalizar la información procedente del sensor (bits por pixel). En general, a mayor número de niveles mayor detalle de la información. Al igual que ocurría en la resolución espectral existe una relación directa entre la resolución radiométrica y la relación S/N.

La resolución radiométrica es variable según la banda espectral bajo análisis. El valor elegido es una decisión de compromiso entre la fidelidad con la que se quiere captar un fenómeno y la cantidad de información que hay que transmitir (no hay que olvidar que toda la información que se genera debe ser tratada y transmitida a tierra). Valores de 64, 128 y 256 e incluso 1024 niveles son valores habituales.

Así por ejemplo Landsat MSS tiene una resolución espectral de $2^6 = 64$ niveles de gris en el canal 6, y Landsat MSS en las bandas 4 a 7 de $2^7 = 128$ niveles de gris, mientras que en Landsat TM es de $2^8 = 256$. Esto significa que se tiene una mejor resolución dinámica y se puede distinguir mejor las pequeñas diferencias de radiación.

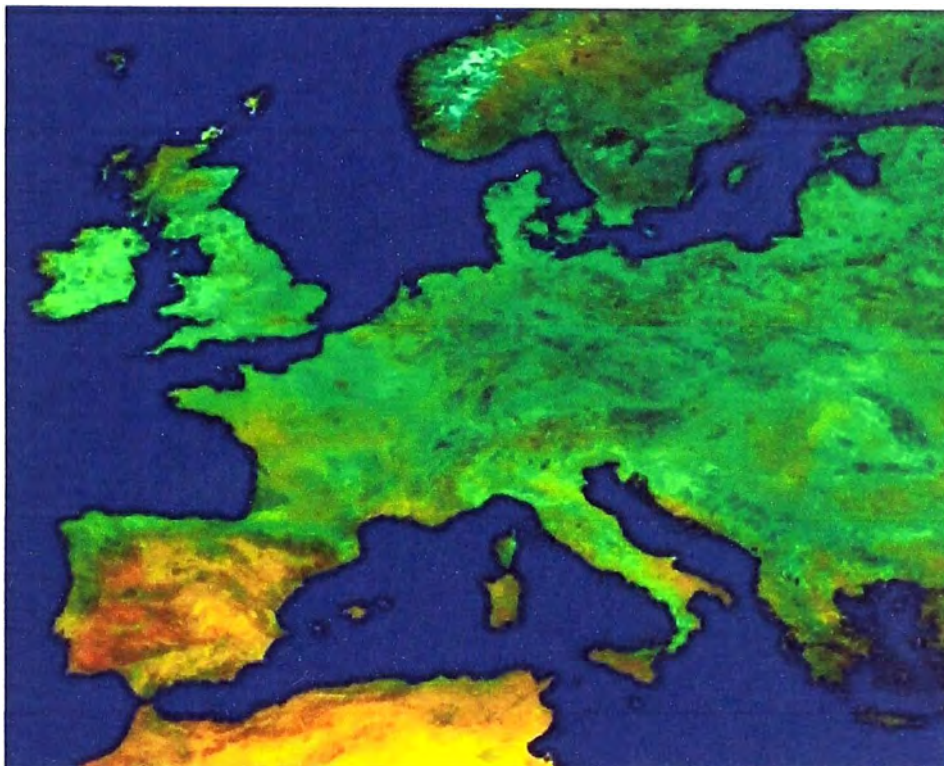


Figura 2.6 Sensor de vegetación SPOT

d. Resolución temporal

Este tipo de resolución se refiere al intervalo de tiempo entre muestras sucesivas de la misma zona de la cobertura terrestre. El ciclo de cobertura depende de las características de la órbita del satélite, así como del diseño del sensor.

La cadencia temporal de los sistemas espaciales varía de acuerdo a los objetivos fijados para el sensor. Los satélites meteorológicos están obligados a facilitar una información muy frecuente, ya que se dedican a observar un fenómeno de gran dinamismo (30 minutos en el Meteosat). Por el contrario, los satélites de recursos naturales ofrecen una cadencia mucho menor.

El ciclo de repetición de los Landsat-1 al Landsat-3 era de 17 días. A partir del

Landsat 4 en 1984 el ciclo de repetición se redujo a 15 días. SPOT permite un ciclo de repetición de entre 3 y 26 días.

2.3.6 Relación entre los diferentes tipos de resolución

Todos los aspectos comentados en el apartado de resolución están íntimamente ligados. A mayor resolución espacial, disminuye habitualmente la temporal y es previsible que se reduzca también la espectral y radiométrica. El principal problema se encuentra en la transmisión de las imágenes a la superficie terrestre.

El aumento en cualquiera de los cuatro tipos de resolución, significa también un incremento considerable del volumen de datos que tanto el sensor como la estación receptora han de procesar. Por esta razón, los primeros Landsat, dotados de media resolución espacial, espectral y radiométrica, poseían un sistema de grabación a bordo que le permitía almacenar imágenes de áreas no cubiertas por la red de antenas receptoras.

En resumen, a la hora de diseñar un sensor remoto habrá que subrayar aquel tipo de resolución más conveniente a sus fines. Si está orientado a la detección de fenómenos efímeros en el tiempo, deberá realizarse su cobertura temporal, aun a costa de perder resolución espacial, como ocurre con los satélites meteorológicos. Si, por el contrario el sensor se orienta a exploración minera, el detalle espacial y espectral resulta más importante reduciéndose en consecuencia su ciclo temporal.

CAPÍTULO III FUSIÓN DE DATOS DE MÚLTIPLES SENSORES

En este capítulo se exponen las bases teóricas conceptuales relacionadas a la fusión de datos de múltiples sensores.

3.1 Generalidades

Sistemas de última generación requieren de sensores para tener cierto grado de inteligencia. En ocasiones los sensores individuales resultan imprecisos y poco fiables, más cuando son aplicaciones típicas. La fusión de datos de múltiples sensores es un compendio de técnicas multidisciplinares, análogas al proceso cognitivo que realizan los humanos, para integrar los datos de múltiples sensores (sentidos) con el fin de realizar inferencias sobre el mundo exterior, convergiendo en un conjunto de resultados (reacción). La fusión de datos pretende obtener un resultado de mejor calidad, a partir de múltiples sensores, eventualmente heterogéneos, realizando inferencias que pueden no ser posibles a partir de uno solo.

Su aplicación es múltiple en el mundo militar, reconstitución de imágenes, diagnóstico médica y en la última década en el mundo del transporte. Muchas aplicaciones necesitan múltiples sensores, tanto para incrementar la cantidad de información como para dar robustez al sistema; el mejor ejemplo es la naturaleza en el caso del hombre, donde muchos sentidos y órganos están duplicados, y en donde las variaciones con respecto al tiempo, minimizan el error. Las técnicas de fusión de datos han surgido como una solución al problema de combinar de forma óptima múltiples fuentes de información redundantes; de esta manera, representan una alternativa que mejora (cuando se utiliza correctamente) los sistemas basados en una sola fuente de información.

Esta mejora viene proporcionada por la redundancia inherente en los sistemas que utilizan múltiples fuentes de información. En este sentido, en este capítulo se estudian las técnicas de fusión de datos existentes en la actualidad y su aplicación al dominio de las redes de sensores visuales. Una red de sensores visuales consiste en un conjunto de cámaras, distribuidas de forma lógica, espacial o geográfica en un entorno y conectadas por una red de transmisión. La información del entorno, obtenida por las redes de sensores visuales, se encuentra distribuida y debe ser combinada o integrada utilizando técnicas de fusión de datos.

Para que la fusión de los datos del entorno, obtenidos por la red de sensores visuales, pueda ser llevada a cabo de una forma óptima, es necesario disponer de una arquitectura de software que proporcione la comunicación entre los nodos implicados y la suficiente flexibilidad al proceso de fusión [9].

La fusión presenta ciertas desventajas, por ejemplo el empleo de múltiples sensores, produce una sobrecarga de información, también la velocidad de respuesta necesaria se compromete, además se necesitan técnicas para evitar datos contradictorios y filtrar errores, que son las técnicas que se encarga la fusión.

Es necesario precisar dos conceptos:

- Fusión sensorial: Combinación de lecturas de varios sensores en una única estructura de datos.
- Integración sensorial: Uso de información de varios sensores para llevar a cabo una operación específica.

3.1.1 Ventajas y limitaciones de la fusión de datos de múltiples sensores

La fusión de datos de múltiples fuentes aparece como respuesta a la posibilidad de aumentar el número de sensores, y así mejorar el resultado de problemas complejos, cómo la restitución de imágenes, la diagnosis médica, la detección de la congestión de carreteras, de incidentes en carretera o del tiempo de viaje.

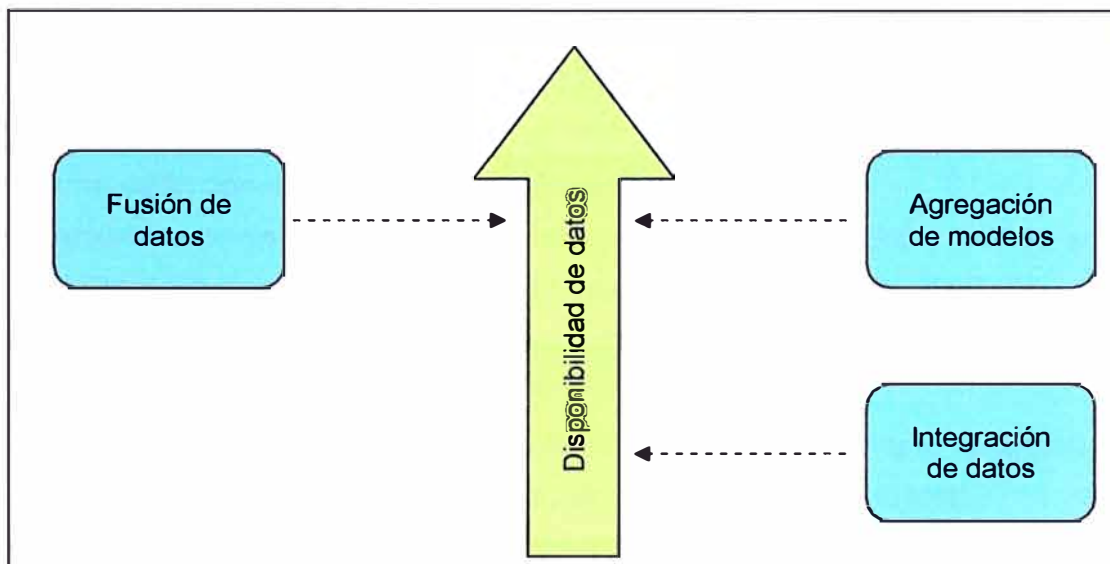


Figura 3.1 Fusión de datos

Uno de los principales objetivos de la fusión de datos es combinar la información obtenida a través de las diferentes fuentes para tomar una mejor decisión, realizando para ello una reducción de la imprecisión e incertidumbre e incrementando la robustez.

La **fusión** es una vía alternativa (Figura 3.1) a la **agregación de modelos**, que sigue la senda abierta por la integración de datos. La primera es más robusta que la segunda, ya que en la agregación los modelos compiten entre ellos con fuentes propias, mientras

que en la fusión las fuentes se complementan y son redundantes. Por otra parte la **integración de datos** utiliza una única fuente principal, usando otra como apoyo o validación.

Para la implementación de un sistema de fusión de datos, se debe tener en cuenta cuales son los principales elementos del proceso así como sus limitaciones, con la finalidad de realizar una correcta planificación de la fusión de datos permitiendo optimizar su rendimiento. Los resultados de Nahum y Pokoski exponen que la fusión de datos de múltiples fuentes aumenta la posibilidad de clasificar correctamente los datos, frente a un número menor de fuentes. También permite observar que:

- La combinación de datos de fuentes poco fiables ($P_N < 0,5$) no aporta ninguna mejora. Así la primera premisa para la fusión será que los datos tengan una fiabilidad aceptable.
- La combinación de datos de fuentes muy precisas ($P_N > 0,95$) no aporta ninguna mejora significativa. Así, si los sensores son muy precisos no tiene sentido invertir tal esfuerzo.
- El aumento del número de sensores mejora la precisión del sistema, si bien esta mejora se vuelve casi imperceptible a partir del octavo a décimo sensor, hay que tener en cuenta que esta pérdida de interés en un mayor número de sensores no será real, si el nuevo sensor aporta datos no redundantes.

Nota: P_N : Posibilidad de clasificar correctamente los datos

a. Ventajas

Las ventajas de la fusión de datos de múltiples fuentes son:

- **Robustez operacional:** Ya que un sensor puede aportar información cuando los otros no están operativos o solo parcialmente operativos.
- **Cobertura espacial extendida:** La correcta fusión de los datos de los sensores distribuidos por el espacio dan una mejor resolución que solo uno de ellos.
- **Cobertura temporal extendida:** Un sensor puede obtener información cuando otros no o de forma más continua.
- **Aumento fiabilidad:** Un buen proceso de fusión puede confirmar la veracidad de una información, dada la inherente redundancia de los datos de las fuentes.
- **Reducción de ambigüedad:** La fusión de la información de múltiples sensores permite reducir el número de hipótesis a realizar.
- **Mejora de detección:** Una correcta fusión facilita la detección de un suceso, gracias a la redundancia de los datos.

b. Limitaciones

Las limitaciones de la fusión de datos de múltiples fuentes son:

- **Calidad y número de sensores:** La calidad del sensor y su número determinará de forma importante la calidad del resultado final de la fusión de datos.

- **Imposibilidad de corregir errores de base:** El proceso de fusión de datos no puede corregir errores en el pre-procesamiento de los datos. Es decir no hay corrección hacia atrás de la inferencia, si bien el Nivel 4 procederá a un refinamiento de los resultados, pero ya a partir del nivel 1 se realiza esto.
- **La calidad de la información sobre los sensores:** Si la información que se posee sobre los sensores (su rendimiento, datos que pueden aportar) es pobre o incorrecta, también lo serán los resultados de la fusión de datos.
- **Inexistencia del algoritmo de fusión de datos ideal:** Cada algoritmo tiene sus fortalezas y debilidades debiendo el gestor elegir el más apropiado para el fin deseado.
- **Falta de datos de entrenamiento:** Nunca habrá suficientes datos para entrenar al sistema, es decir los recursos son limitados.
- **Dificultad de cuantificación del rendimiento:** No existen parámetros claros y globales para determinar si un sistema de fusión de datos es mejor que otro. Queda así en manos del gestor una correcta valoración.
- **Dinamismo del proceso:** Se tiene dificultad para el análisis desde el punto de vista estático, siendo así difícil de valorar su rendimiento de forma generalizada, ya que dependerá de su grado de aprendizaje y de los datos disponibles en ese momento.

3.1.2 Configuración de múltiples sensores

Para ello es necesaria una red multi – sensorial y que puede presentar diversas arquitecturas. La fusión se realiza a través de la complementariedad y/o contraste de información procedente de la red de sensores. Se puede hablar de las siguientes configuraciones.

a. Complementaria

Es para complementar la información del entorno que un solo sensor no puede obtener. Los sensores no dependen unos de otros directamente; se disponen de modo que puedan combinarse para obtener una mayor visión del fenómeno a medir. (Figura 3.2). Un ejemplo de ello es la aplicación de la tesis fusión de datos distribuida en redes de sensores visuales utilizando sistemas multi – agente [9].

b. Competitiva

Se obtiene información redundante de una misma magnitud física produciéndose una competencia entre los sensores. Los sensores no tienen que ser idénticos y se pueden usar diferentes métodos de medida. Esta es la configuración más difícil, debido a que presenta datos redundantes, inconsistencias de lecturas, datos erróneos, detección de fallas. Es usada en sistemas críticos tolerantes a fallos. La Figura 3.3 ilustra esta situación en donde un objeto (círculo azul) es visto por los cuatro sensores.

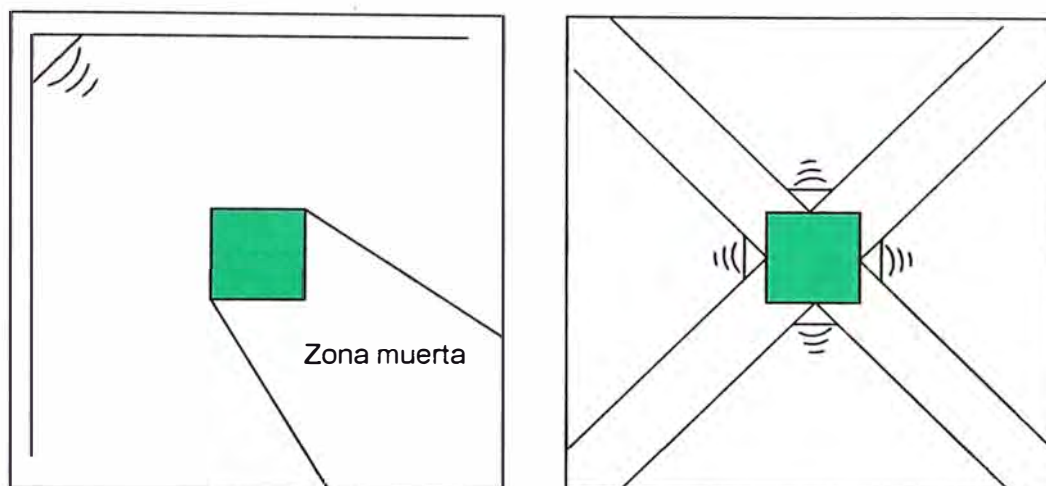


Figura 3.2 Configuración complementaria

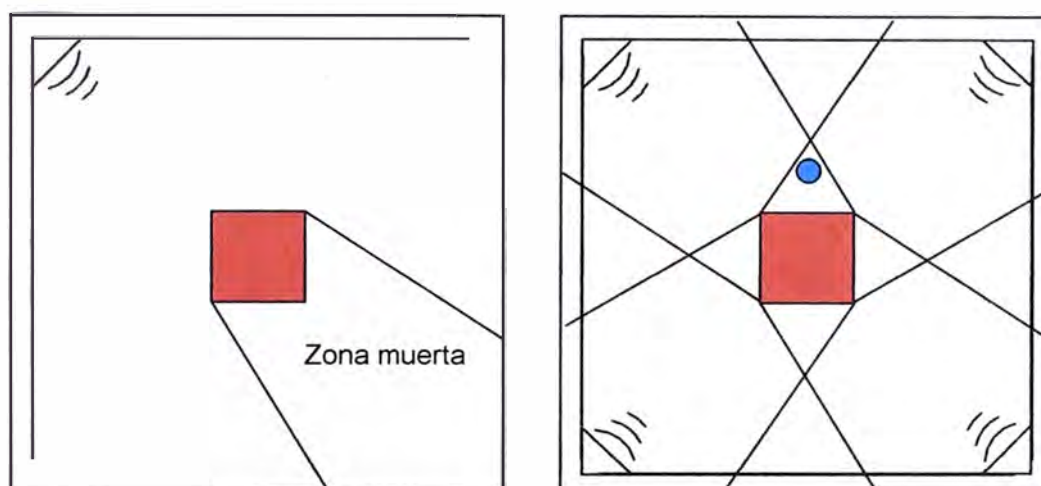


Figura 3.3 Configuración competitiva

c. Cooperativa

Cuando la fusión sensorial realiza la combinación de las magnitudes de las medidas de la red de sensores obteniendo una nueva magnitud. Es el caso donde es imposible obtener con sensores individuales. Ejemplo: visión estereoscópica u obtención de gradientes o velocidades, hace que la seguridad y precisión decrezca al contrario de la competitiva. Un ejemplo de ello es la aplicación de fusión de datos para control de tráfico marino [8].

d. Híbrida

Esta configuración no es rígida. Es cuando una determinada disposición física de sensores puede presentar características de más de una configuración anterior.

3.1.3 Procesamiento sensorial

Se tienen que tener en cuenta dos definiciones importantes:

Procesamiento sensorial de medidas.- Tratamiento de la información procedente de medidas de magnitudes físicas (posición, orientación, velocidad, fuerza, etc.).

Procesamiento sensorial para el reconocimiento.- Reconocimiento de objetos en el entorno. Es decir de la identidad de un objeto por: color, forma, tamaño, etc.

Estos son descritos a continuación:

a. **Procesamiento sensorial de medidas**

Un sistema mono sensor se limita a tres etapas:

Detección: el sensor detecta y recoge información de una determinada magnitud. La detección puede ser de interacción pasiva o activa.

Pre-procesamiento: Orientada a generar datos que correspondan fielmente con la medida. Es decir a la información, se le elimina el ruido, se la calibra, se la realza, etc.)

Clasificación: Los datos se clasifican de cara a dar una estimación de la medida de magnitud que se trate.

b. **Procesamiento sensorial de reconocimiento**

La entrada es la lectura realizada por el sensor de una determinada magnitud, mientras que la salida, es la interpretación de los datos originales. Puede ser indiferente si existe más de un sensor o solo uno. Con un único sensor hay cuatro etapas:

Detección: el sensor detecta y recoge información de una determinada magnitud. La detección puede ser de interacción pasiva o activa.

Pre-procesamiento: Orientada a generar datos que correspondan fielmente con la medida. Es decir a la información, se le elimina el ruido, se la calibra, se la realza, etc.)

Extracción de características: Es un procesamiento más complejo, como por ejemplo: contornos, esquinas, etc.

Interpretación / reconocimiento: Esta consiste en encontrar el mejor encaje posible de los datos dentro de la información requerida para reconocer el objeto.

3.1.4 Tipos de fusión sensorial

La fusión consiste en combinar datos independientes en una sola lectura, donde los datos fusionados se consideran cómo si procediesen de un solo sensor abstracto. Con la fusión sensorial se obtienen resultados más fiables y precisos.

Existen dos tipos de fusiones sensoriales:

- a) Fusión sensorial de medidas (centralizada, distribuida e híbrida) y,
- b) Fusión sensorial para el reconocimiento (a nivel de datos, de características y de interpretación).

a. **Fusión centralizada**

Los datos se fusionan antes de la etapa de clasificación (Figura 3.4). Se componen de tres fases:

- 1) Alineamiento y asociación.
- 2) Correlación de datos
- 3) Fusión.

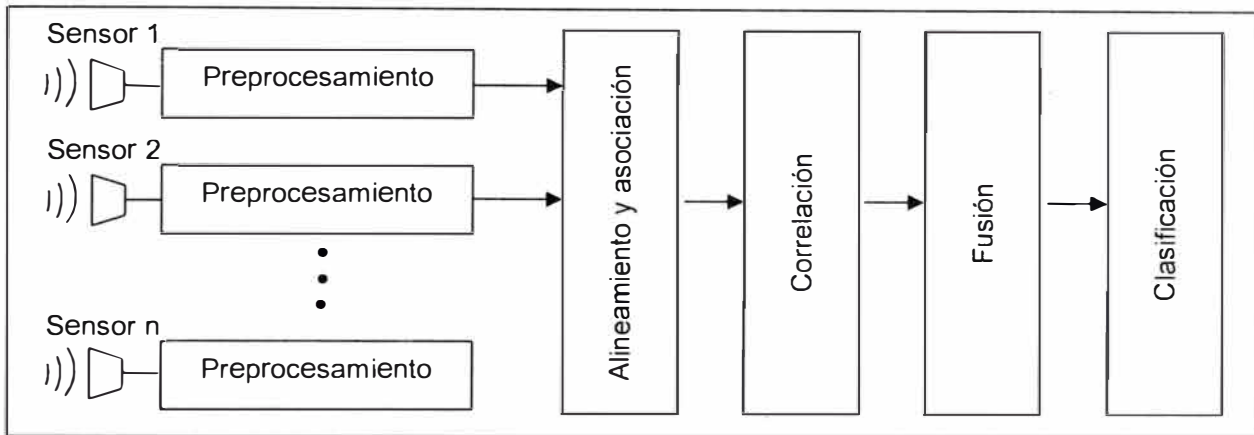


Figura 3.4 Arquitectura para la fusión centralizada

1. **Fase de alineamiento y asociación.-** Que permite transformar las unidades de medida de cada sensor en una única.
2. **Fase de correlación de datos.-** Para determinar qué datos representan medidas de la misma magnitud.
3. **Fase de fusión.-** Con técnicas de estimación, como filtros de Kallman y sus variantes. Tiene como ventaja que generalmente es más preciso, pero el inconveniente que se transmite la totalidad de los datos hasta la unidad central.

b. Fusión distribuida

Es aquella en la que cada sensor realiza una estimación de la medida teniendo en cuenta únicamente sus propios datos generando un vector de estado por cada sensor. (Figura 3.5). La fusión se produce sobre los vectores. Se realiza igual que las fases de: alineamiento, asociación y correlación, pero no se realiza sobre todos los datos, sólo sobre los vectores de estado de cada sensor. Tiene cómo ventaja que reduce notablemente la comunicación, ya que los datos están comprimidos en los vectores. El proceso de correlación es menos complejo. Tiene cómo desventaja que no es tan precisa como la centralizada.

c. Fusión híbrida

La fusión híbrida resulta de la combinación de las arquitecturas de fusión centralizada y distribuida. En la Figura 3.6, se ilustra la arquitectura para la fusión híbrida. En modo normal opera como distribuida y si se requiere una mayor precisión se usa la arquitectura centralizada.

d. Fusión a nivel de datos

Se realizan al más bajo nivel, directamente sobre los datos capturados por los

sensores (Fusión de señal de pixel). La condición que se debe cumplir es que los datos a fusionar sean de características similares. Se usan sensores equivalentes o dos medidas del mismo sensor en distintos instantes de tiempo. Se usa para estimaciones y eliminación o reducción de ruido. Presenta como ventaja una sencilla forma de implementación, y como desventaja que opera a nivel de todos los datos, originando carga computacional. La Figura 3.7 ilustra este tipo de fusión.

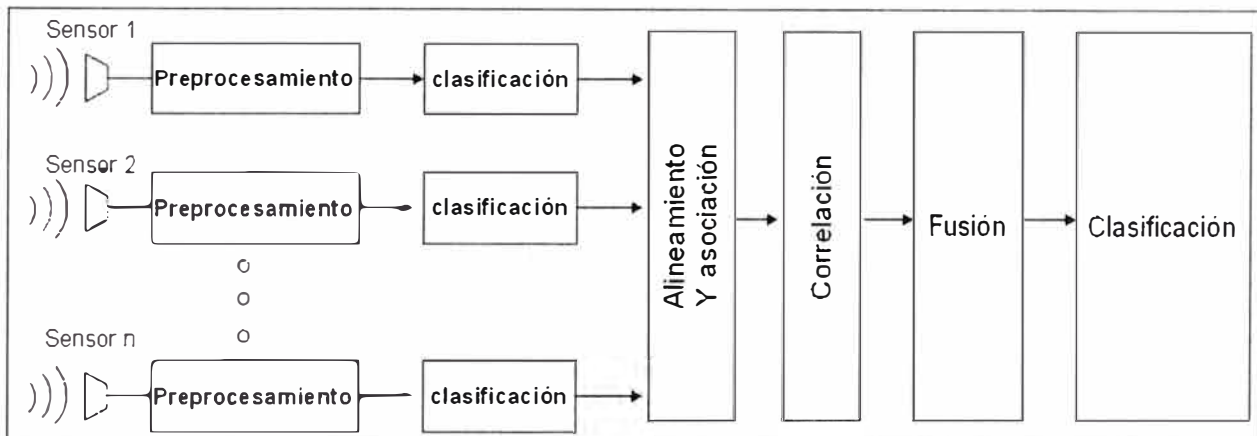


Figura 3.5 Arquitectura para la fusión distribuida

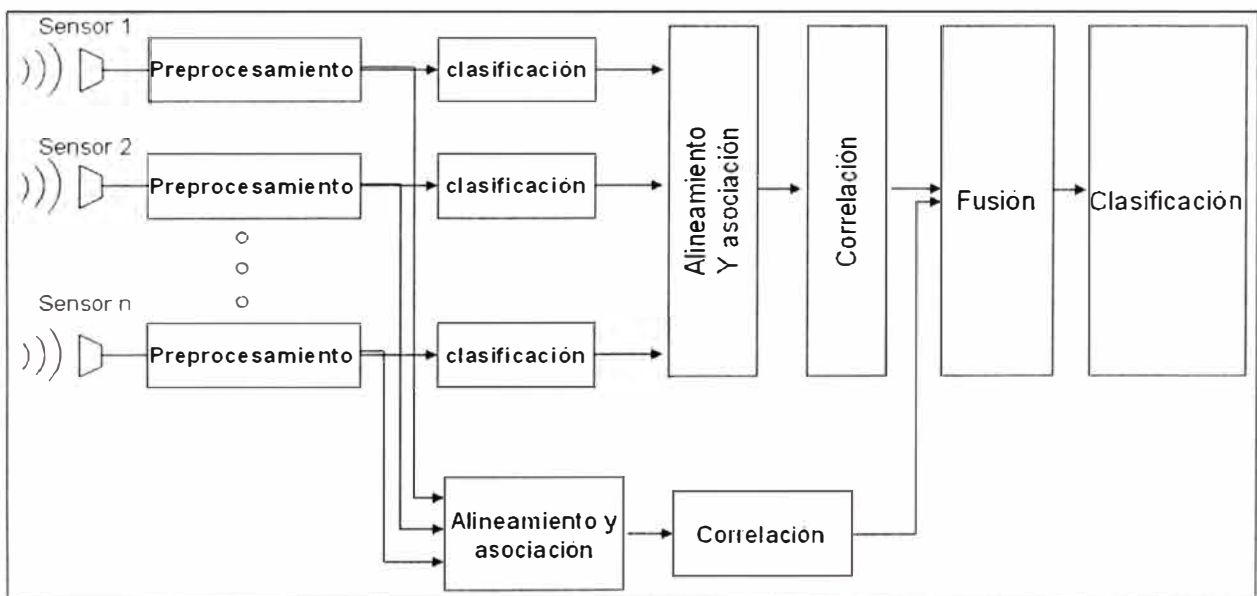


Figura 3.6 Arquitectura para la fusión híbrida

e. Fusión a nivel de características

La fusión se realiza a nivel intermedio, sobre características individuales, y sobre cada vector (Figura 3.8).

f. Fusión a nivel de interpretación

Todos los procesos se realizan individualmente en cada sensor. Solo se fusiona al final de la interpretación (Figura 3.9).

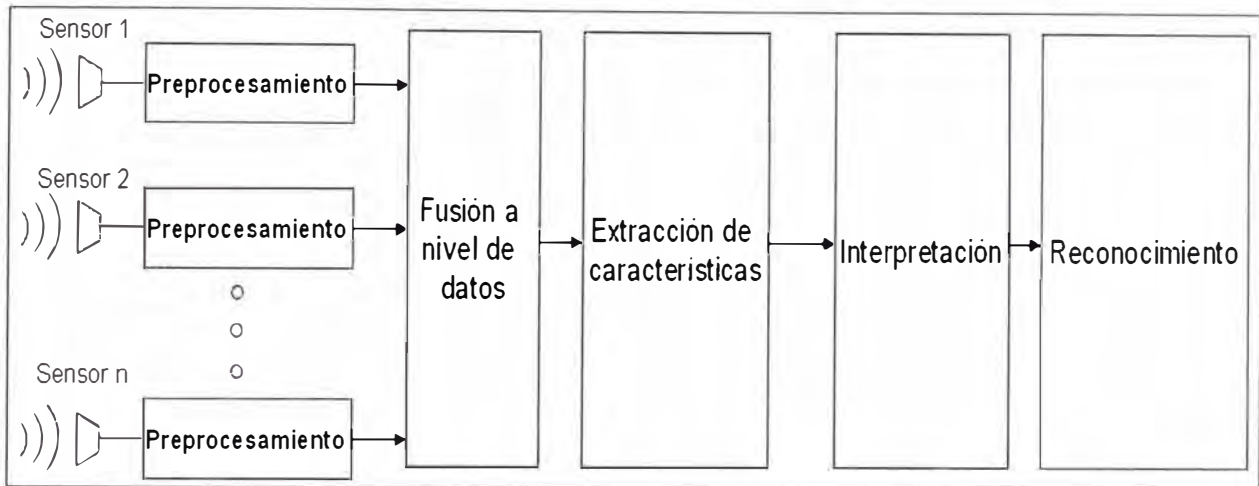


Figura 3.7 Arquitectura para la fusión a nivel de datos

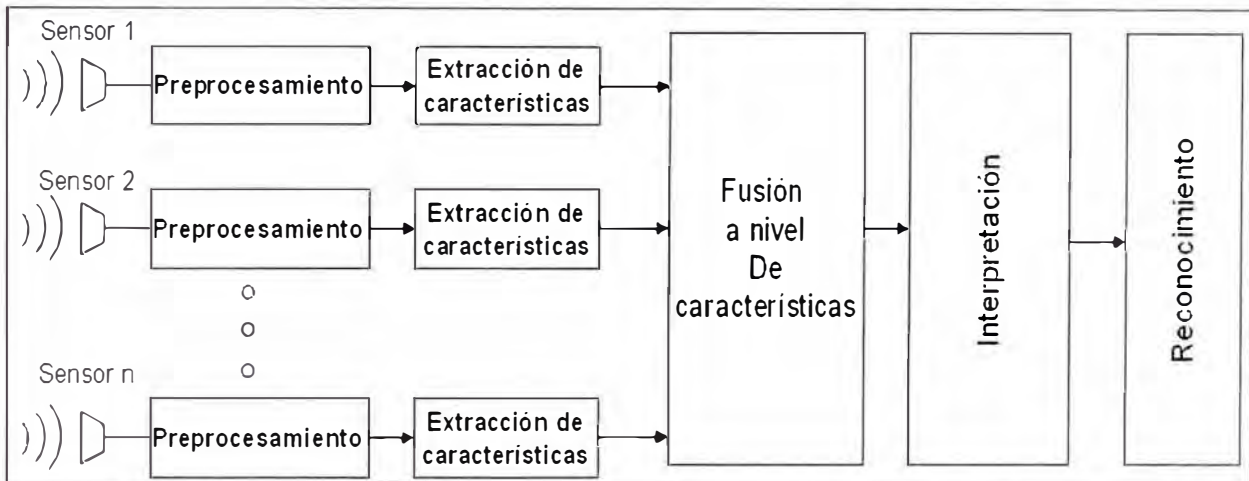


Figura 3.8 Arquitectura para la fusión a nivel de características

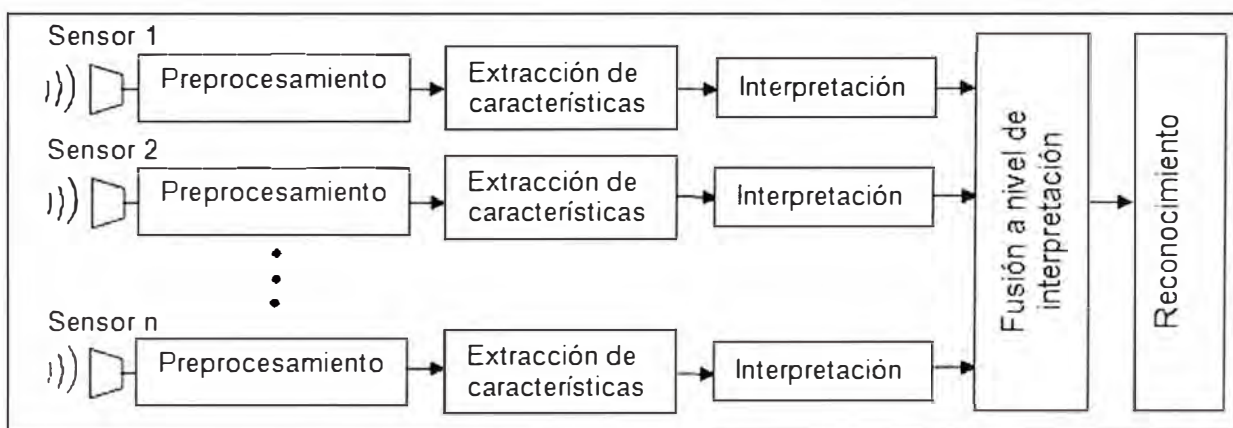


Figura 3.9 Arquitectura para la fusión a nivel de interpretación

3.2 Niveles de Fusión

La Junta de Directores de Laboratorios (JDL: Joint Directors of Laboratories) concibe la fusión como un proceso integral de tratamiento de datos, subdividido en niveles que

van desde la captura de los datos hasta el resultado final, incluyendo la interacción de dichos resultados con el receptor y/u operador.

Los niveles son los mostrados en la Figura 3.10. Estos serán desarrollados en las siguientes subsecciones: Nivel 0: Pre-proceso de las fuentes, Nivel 1: Evaluación del objeto, Nivel 2: Evaluación de la situación, Nivel 3: Evaluación del futuro, Nivel 4: Proceso refinamiento, Nivel 5: Refinamiento cognitivo, La gestión de la base de datos, Interacción de la persona con el ordenador.

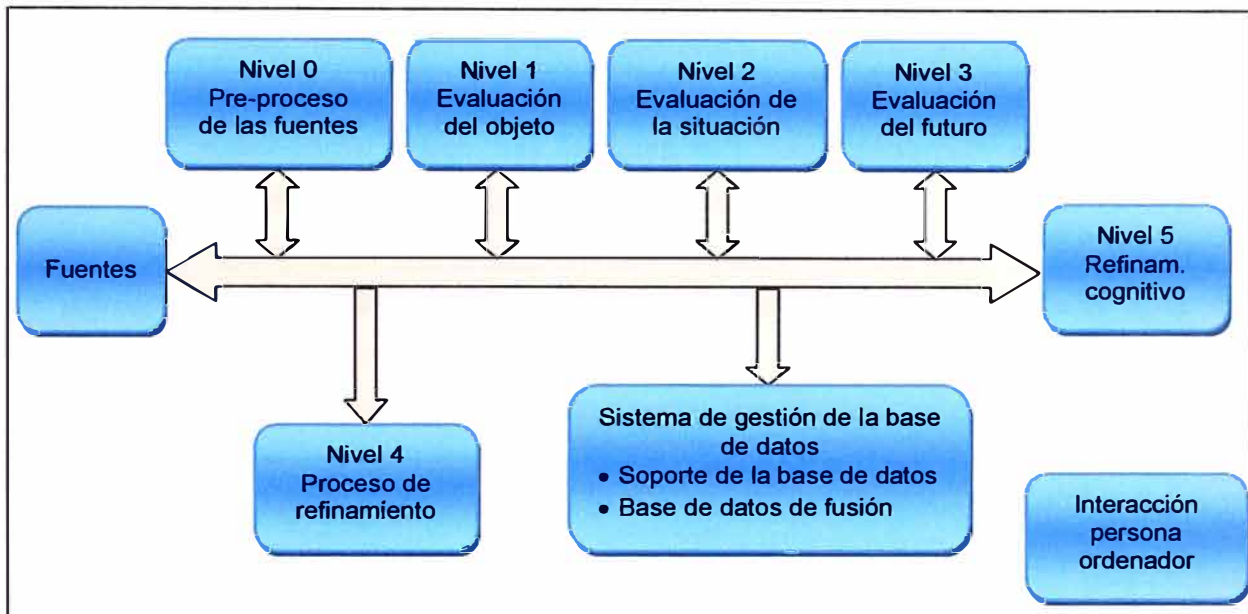


Figura 3.10 Proceso de Fusión de Datos

3.2.1 Nivel 0: Pre-proceso de las fuentes

Los datos de las fuentes son habitualmente pre-procesados para una fusión posterior, filtrando datos o alineándolos temporalmente u otras acciones previas.

Este proceso lo lleva a cabo, por lo general, el software asociado a cada uno de los sensores comerciales de forma independiente del resto de sensores. Se puede considerar así una pre-fusión. Es a este nivel donde cada uno de los sensores aporta sus datos obtenidos de forma independiente del resto.

3.2.2 Nivel 1: Evaluación del objeto

Combinación de los datos de los sensores para obtener posición, velocidad, atributos y características de la entidad; siendo la entidad, en transporte por ejemplo, un vehículo, un incidente de tráfico o la congestión. Los algoritmos de este nivel son:

Alineación de datos: Ajustes espacio-tiempo y de unidades para posibilitar un procesamiento posterior.

Correlación Dato/Objeto: Asociación y correlación de datos para cada individuo. Para permitir la correcta agrupación de los datos

Estimación de atributos del objeto: (posición, cinemática, etc.) mediante la combinación de modelos físicos y supuestos estadísticos para la obtención del vector de estado.

Estimación de la identidad del objeto: Obtención de la identidad mediante estos métodos: 1) Paramétricos: Bayes, Dempster-Shafer, 2) No paramétricos: Redes neuronales, o 3) De lógica difusa (Fuzzy Logic).

3.2.3 Nivel 2: Evaluación de la situación

Interpretación de los resultados del nivel anterior, por ejemplo si se determina en el paso anterior (caso transporte) que las velocidades detectadas en los vehículos de la carretera que está siendo sensada son bajas, se podría interpretar que se está en un estado de congestión de tráfico. Las técnicas más adecuadas para este nivel son la Inteligencia artificial (IA) y el razonamiento automático.

Los algoritmos de este nivel son:

Agregación de objetos: Agregar los datos de cada una de las entidades para una visión global de la situación.

Interpretación contextual: Tener en cuenta los factores externos al estudio que pueden afectar de forma indirecta (factores climatológicos afectan visión de entidades)

Evaluación multiperspectiva: Observación global del problema, desde el exterior e interior.

3.2.4 Nivel 3: Evaluación del futuro

Proyección de futuro de la entidad analizada a partir de la situación actual. Los modelos utilizados para este nivel son la inteligencia artificial, los modelos predictivos, el razonamiento automático y la estimación estadística.

Los algoritmos de este nivel son:

Estimación/Agregación de capacidad de fuerza: Agregación de la información de diversos subsistemas para determinar sus interrelaciones y la robustez del sistema.

Estimación de implicaciones: Resultados de una hipotética acción sobre el sistema.

Evaluación multiperspectiva: Análoga al del nivel 2, observación del sistema desde el exterior e interior.

3.2.5 Nivel 4: Proceso refinamiento

Metaproceso que monitoriza todo el proceso de fusión de datos para mejorar el rendimiento del proceso en tiempo real, mediante 1) la optimización de la utilización de recursos, 2) la modelización sensorial y 3) la computación de medidas de perfeccionamiento.

Este nivel se considera parcialmente dentro-fuera del proceso de fusión, ya que éste refinamiento es necesario para el correcto funcionamiento de la fusión y de las operaciones a la que esté destinada la fusión de datos.

Los algoritmos de este nivel son:

Gestión de la misión: Dirección de los recursos existentes con el fin de obtener los resultados deseados.

Predicción de Entidad: Definir que entidades específicas debe reconocer el proceso

Requerimientos de las fuentes: Definir la infraestructura necesaria de las fuentes para que puedan identificar las entidades

Modelización del rendimiento del sistema: Definir la estructura del sistema de fusión de datos, la relación entre fuentes, los componentes de procesamiento, etc.

Control del sistema: Tal como control de multiobjetivos y optimización.

3.2.6 Nivel 5: Refinamiento cognitivo

Mejora del sistema de fusión a partir de la relación Sensor-Procesamiento-Persona, proyectando modelos en los que la representación de los resultados (ya sean intermedios o finales) permita al operador identificar posibles errores en el procesamiento, y que éste previamente haya podido detectar errores en los datos suministrados por los sensores.

3.2.7 La gestión de la base de datos

Es un punto clave dada la gran cantidad de datos que se manejan durante el proceso. Para desarrollar esta función es necesario un considerable esfuerzo computacional destacando que el software comercial habitual es incapaz de gestionar el problema completo de fusión de datos.

3.2.8 Interacción de la persona con el ordenador

Este elemento, considerado externo a la fusión, es importante en el proceso de fusión ya que una correcta interfaz del sistema, será clave para el refinamiento cognitivo.

3.3 Técnicas de Fusión

En esta sección se clasifican las diferentes técnicas de fusión de datos; luego se describe las más utilizadas para así poder elegir de forma más sencilla el operador que mejores características presente para la solución del problema específico.

Es necesario precisar algunos aspectos.

x_i Representan el grado de de credibilidad de la información emitida por la fuente i .

I Intervalo de los valores de x_i .

$F(x_i, \dots, x_n)$ Operador de combinación de la información

En esta sección se verá la clasificación según su comportamiento, la clasificación según la lógica matemática y la descripción de las técnicas más utilizadas.

3.3.1 Clasificación según su comportamiento

Para no hacer esta clasificación excesivamente complicada se asume que se está fusionando dos informaciones, siendo así $x_i = (x, y)$, y por lo general, excepto algún caso muy específico, $I = [0,1]$. Además por la propiedad de semejanza entre el operador y el entorno matemático donde opera $F(x, y) = [0,1]$.

La clasificación en función de su comportamiento, se hace en primer grado según su dependencia del contexto y en segundo término según su constancia.

a. Clasificación según dependencia de contexto

Son tres: Independientes del contexto (ICCC o con comportamiento constante e ICCV o variable) y dependientes del contexto.

a.1 Operador ICCC (Independiente del Contexto con Comportamiento Constante)

La primera clase está compuesta por los operadores que tienen igual comportamiento, independientemente del valor de la información a fusionar, y que computa dichos datos sin información respecto al exterior o el contexto. Así respetan siempre una y solo una de las siguientes cualidades:

Las técnicas más conocidas que se comportan de este modo son Bayes, Dempster-Shafer y algunas clases de lógica difusa.

$$\begin{aligned} \forall(x, y) \in I^2, F(x, y) &\leq \min(x, y) \\ \forall(x, y) \in I^2, \min(x, y) &\leq F(x, y) \leq \max(x, y) \\ \forall(x, y) \in I^2, F(x, y) &\geq \max(x, y) \end{aligned} \quad (3.1)$$

a.2 Operador ICCV (Independiente del Contexto con Comportamiento Variable)

Esta segunda clase, comprende a los operadores que siendo independientes del contexto no lo son del valor de x e y . Así se pueden comportar de forma severa para ciertos valores de credibilidad, mientras lo hace de forma indulgente para otros.

Esto quiere decir que F respetará más de una de las cualidades presentadas en ICCC. Las técnicas más conocidas que operan así son algunos tipos de lógica difusa y de inteligencia artificial, como los sistemas expertos (por ejemplo los de tipo MYCIN).

a.3. Operador DC (Dependiente del Contexto)

La tercera clase incluye los operadores que son dependientes del contexto, es decir no solo dependen de x e y , sino también del conocimiento global o características de las fuentes de datos (por ejemplo: conflicto entre fuentes, credibilidad de las fuentes).

Estos operadores son especialmente interesantes para problemas de clasificación, ya que permiten combinar información relacionada con una clase de una forma, e información relacionada con otra clase de forma diferente.

Técnicas conocidas, que se comporten según lo detallado, son algunos tipos de

conjuntos difusos y de inteligencia artificial, como las híbridas.

b. Clasificación según su constancia

La clasificación de las técnicas según su constancia son las siguientes:

b.1 Severo

Se aceptará que un operador tiene un comportamiento severo si se comporta de forma conjuntiva, es decir: $F(x, y) \leq \min(x, y)$. Así estos operadores representan un consenso entre las partes de información, o sus partes comunes o redundantes, reduciendo la información más incierta y dando mayor fiabilidad al sensor más restrictivo. Se busca así satisfacer simultáneamente los criterios u objetivos de la fusión.

b.2 Prudente

El operador será prudente si se comporta de forma comprometida, es decir: $\min(x, y) \leq F(x, y) \leq \max(x, y)$. Los operadores que pertenecen a este grupo proveen una información global, intermedia entre los diferentes valores de los sensores. La redundancia entre diferentes elementos puede ser tomada en cuenta con algunos tipos de operadores como las integrales difusas.

b.3 Indulgente

Será indulgente el operador si se comporta de forma disjunta, es decir: $F(x, y) \geq \max(x, y)$. Estos operadores incrementan la certeza que tenemos sobre una información, dando mayor ponderación al sensor que da la información menos incierta; expresa así, redundancia entre los criterios.

3.3.2 Clasificación según la lógica matemática

Son tres: Probabilística, evidencial y difusa; es decir, se incorpora la incertidumbre.

Este parámetro es la diferencia clave entre las técnicas de Bayes, Dempster-Shafer y conjuntos difusos; mientras que en la inteligencia artificial el principal factor diferenciador es la forma de aprendizaje. Dicha incertidumbre puede ser atribuida a las observaciones o bien a las conclusiones llegadas. Las formas más importantes de incorporarla son la:

a. Probabilística

Es el modelo de lógica matemática más difundido y también el que cuenta con una base teórica más potente, basada en la teoría clásica de la probabilidad. La determinación de las funciones de distribución de probabilidades y de las probabilidades condicionales, a través de métodos empíricos o estocásticos, imponen hipótesis muy restrictivas, poco creíbles en problemas complejos. Por otro lado esa potencia de la base teórica permite tener poca complejidad computacional. Las leyes clásicas de probabilidad y Bayes son las técnicas de fusión con base probabilística.

b. Evidencial

La lógica evidencial define probabilidades no aditivas como noción general para la

suposición lógica y la probabilidad. La idea es aumentar la lógica proposicional estándar considerando un operador que representa el estado de conocimiento que un agente racional tiene del mundo. Las probabilidades son así definidas sobre el universo de operadores de todas las sentencias, y está argumentado que ésta es la mejor información disponible para el analista. Dempster-Shafer y la teoría evidencial generalizada son las técnicas de fusión con base evidencial.

c. Difusa

Aparece como respuesta a la lógica clásica bivalente, permitiendo representar de forma matemática conceptos o conjunto imprecisos. Incluyéndose así en la lógica multivaluada, admitiendo varios valores como verdades posibles. Los Conjuntos difusos y algunos operadores híbridos de inteligencia artificial son las técnicas de fusión con esta base lógica.

3.3.3 Descripción de las técnicas más utilizadas

Entre las técnicas más utilizadas en la fusión de datos se encuentran:

- a) Bayes.
- b) Dempster-Shafer.
- c) Componentes principales
- d) Conjuntos difusos.
- e) Inteligencia artificial.

Estas se centran especialmente en las de lógica probabilística, evidencial y difusa.

a. Bayes

Esta técnica de fusión de datos utiliza la lógica probabilística y se fundamenta en la regla de Bayes. Se puede decir que esta técnica pertenece a los algoritmos que usan conocimientos a priori, es decir, razonamiento causa efecto; sobre el espacio de observación para realizar inferencias sobre la identidad de los objetos. La inferencia bayesiana proporciona un método para determinar la veracidad de la probabilidad condicional o a posteriori (razonamiento efecto causa) de una hipótesis dada (Figura 3.11). Si E es el evento a evaluar, y x_1 y x_2 los elementos de información dados por dos sensores, a partir del Teorema de Bayes obtenemos:

$$\begin{aligned}
 p(E|x_1, x_2) &= p(E) \frac{p(x_2|E, x_1)p(E|x_1)}{p(x_2|x_1)} \\
 &= \frac{p(x_2|E, x_1)p(x_1|E)p^2(E)}{p(x_2|x_1)p(x_1)} \\
 &= p(x_2|E, x_1)p(x_1|E) \frac{p^2(E)}{p(x_1, x_2)}
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

Esta ecuación se puede reducir asumiendo que las fuentes y sus datos son

independientes entre ellos, obteniéndose:

$$p(E|x_1, x_2) = \frac{p(x_2|E)p(x_1|E)p^2(E)}{p(x_1)p(x_2)} \quad (3.3)$$

Generalizando para "n" elementos de información, se tiene:

$$p(E|x_1, \dots, x_n) = \frac{p(x_n|E, x_1, \dots, x_{n-1}) \dots p(x_1|E)p^n(E)}{p(x_1, \dots, x_n)} \quad (3.4)$$

Si esta expresión no depende del orden en que se reciben los elementos de información, la ecuación [3.4] se puede simplificar obteniendo la siguiente expresión:

$$p(E|x_1, \dots, x_n) = p^2(E) \frac{\prod_{i=1}^n p(x_i|E)}{\prod_{i=1}^n p(x_i)} \quad (3.5)$$

Si se define $\Omega = \{E_1, \dots, E_r\}$ como el conjunto de eventos a evaluar se puede tomar la decisión final según los siguientes criterios:

1. Regla de máxima probabilidad a posteriori: El estado más probable es aquel con la mayor probabilidad a posteriori.

$$E_k = \arg \max_{1 \leq i \leq r} \{p(E_i|x_1, \dots, x_n)\} \quad (3.6)$$

2. Regla de máxima probabilidad: El estado más probable es aquel con la mayor función de probabilidad.

$$E_k = \arg \max_{1 \leq i \leq r} \left\{ \prod_{j=1}^n p(x_j|E_i) \right\} \quad (3.7)$$

Se trata de una técnica severa donde el operador es independiente del contexto y del valor de las variables. La principal ventaja de la técnica de Bayes para la fusión de datos es que tiene un formalismo bien desarrollado, donde la evidencia es tratada como una función de probabilidad. Así usando esta técnica, se pueden expresar conocimientos a priori de forma estocástica para obtener el estado más probable del sistema.

Desde el punto de vista de la aplicación, se necesita una fuerte estimación de las funciones de probabilidad ($p(x_j | E_i)$) y de las de probabilidad a priori ($p(E_i)$) que modelan el conocimiento aportado por cada una de las fuentes, incluso en caso de total ignorancia. (E_i es el estado más probable).

La práctica común es definir $p(E_i)$ como uniforme ($p(E_i)=1/r$) hecho que no aporta mayor conocimiento, y estimar $p(x_j | E_i)$ en función de la credibilidad que tenga cada una de las medidas tomada por los diferentes sensores, usando para ello métodos estadísticos de aprendizaje.

b. Dempster-Shafer

La inferencia Dempster-Shafer (Figura 3.12), es el algoritmo de fusión de datos que se fundamenta en la lógica evidencial, se utiliza cuando a la suma de informaciones

aportada por las fuentes de datos no se les puede asociar el 100% de la probabilidad de certeza. El algoritmo capta y combina la veracidad o conocimiento existente usando la regla de Dempster, que encuentra la intersección o conjunción de los eventos identificados por las fuentes de información y sus probabilidades asociadas.

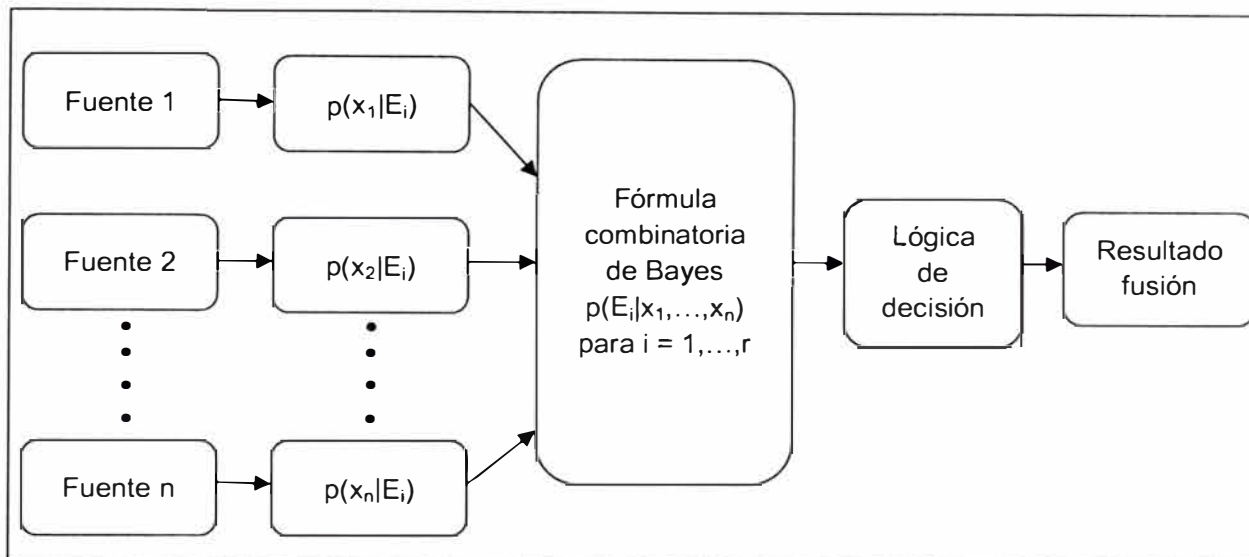


Figura 3.11 Proceso de fusión con la técnica de Bayes.

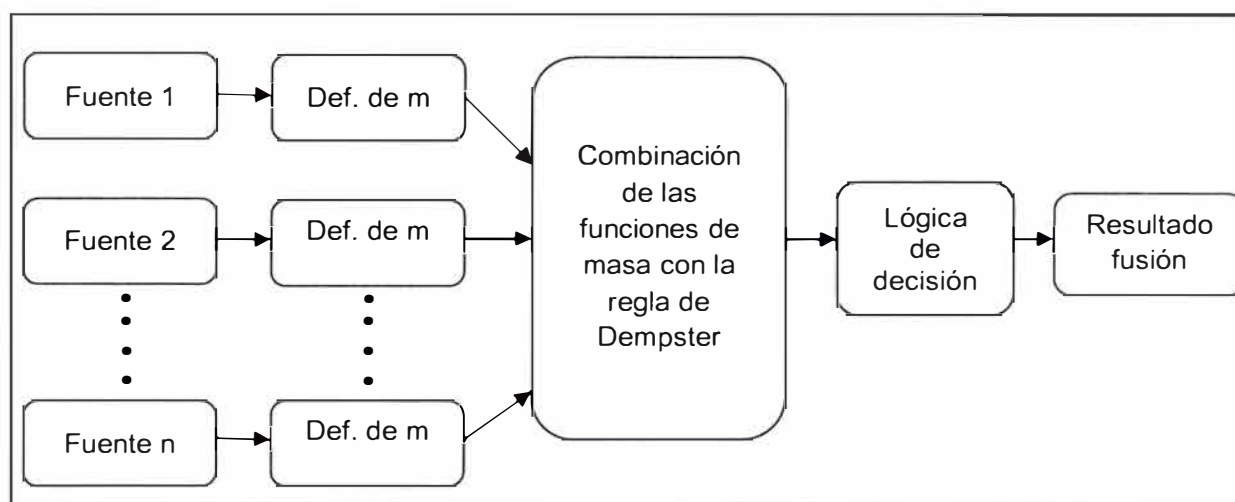


Figura 3.12 Proceso de fusión con la técnica de Dempster - Shafer.

La información del sensor i está representada por la función de masa (o credibilidad) $m_i \in [0,1]$ que asigna valores a cada uno de los subconjuntos del conjunto de discernimiento D (conjunto de eventos considerados), ignorando como se dividen estos valores de masa dentro del subconjunto. Además a partir de los valores de masa del conjunto se pueden derivar otras funciones, como la plausibilidad, la credibilidad, y la duda.

La combinación se realiza mediante la suma ortogonal de Dempster, que para "n"

fuentes resulta:

$$m(A) = \bigoplus_{i=1}^n m_i(A) = \begin{cases} 0, & \text{si } A = \emptyset \\ \frac{1}{1-k} \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = A} m_1(B_1) m_2(B_2) \dots m_n(B_n), & \text{si } A \neq \emptyset \\ 1, & \text{si } A = D \end{cases} \quad (3.8)$$

Donde: A, B_1, \dots, B_n son subconjuntos de D y k , que se puede interpretar como la medida de conflicto entre fuentes, se obtiene:

$$k = \sum m_1(B_1) m_2(B_2) \dots m_n(B_n) \quad (3.9)$$

Altos valores de k representan un grado de conflicto alto entre las fuentes, dando también una indicación de la exhaustividad del conjunto de discernimiento D . Así se debe tener en cuenta en el momento de evaluar la calidad de la combinación, ya que cuando el valor sea muy alto, la combinación normalizada (Siendo $1 - k$ el factor de normalización) tomará decisiones cuestionables que no podrán apoyar conclusiones aceptables.

Podemos definir además la credibilidad, la plausibilidad y la comunalidad como:

$$Com_i(A) = \sum_{A \subset B} m_i(B) \quad (3.10)$$

donde:

$$Com(A) = \bigoplus_{i=1}^n Com_i(A) = \frac{1}{1-k} Com_1(A) Com_2(A) \dots Com_n(A) \quad (3.11)$$

y

$$Cre(A) = \sum_{B \subset A} m(B) \quad (3.12)$$

$$Pl(A) = \sum_{B \subset A = \emptyset} m(B) = 1 - Cre(\bar{A}) \quad (3.13)$$

Se puede considerar que $Cre(A)$ y $Pl(A)$ son los límites inferiores y superiores del intervalo de credibilidad $[Cre(A), Pl(A)]$ respectivamente, donde $Cre(A) - Pl(A)$ es la expresión natural de la ignorancia concerniente a A .

Se puede observar que las funciones de masa son muy similares a las de probabilidad, ya que se asigna una evidencia a uno o más subconjuntos del conjunto de proposiciones. Pero con esta técnica se puede asignar evidencia al conjunto de discernimiento D . Es decir, la función de masa puede representar explícitamente ambigüedad o ignorancia sobre la observación mediante:

$$Cre(A) + Cre(\bar{A}) + Cre(D) = 1 \quad (3.14)$$

mientras que en Bayes no existe esta posibilidad, obteniendo lo siguiente:

$$p(A) + p(\bar{A}) = 1 \quad (3.15)$$

Así se puede considerar que el método de Bayes es un caso particular de la teoría evidencial donde $Cre(D) = 0$.

Si se define $D = \{E_1, \dots, E_r\}$ como el conjunto de estados a evaluar se puede tomar la decisión final según los siguientes criterios:

1. Regla de máxima credibilidad: El estado más probable es aquel con mayor credibilidad.

$$E_k = \arg \max_{1 \leq i \leq r} \{Cre(E_i)\} \quad (3.16)$$

2. Regla de máxima plausibilidad: El estado más probable es aquel con mayor plausibilidad.

$$E_k = \arg \max_{1 \leq i \leq r} \{Pl(E_i)\} = \arg \min_{1 \leq i \leq r} \{Cre(E_i)\} \quad (3.17)$$

Se trata así de una técnica severa donde el operador es independiente del contexto y del valor de las variables.

c. Componentes principales

Usualmente, el problema de la fusión de datos de imágenes se produce cuando diferentes sensores obtienen imágenes diferentes del mismo objeto y se trata de obtener un resultado que integra las mejores características de cada uno de los sensores. Para superar este problema, la técnica de fusión ACP se encargará de la mejora de las características espaciales [19].

El análisis de componentes principales es un método de transformación en un espacio característico diseñado para eliminar las redundancias existentes entre las funciones similares o imágenes. Se trata de una transformación del tipo lineal.

$$PCA = W_{PCA} \cdot Y \quad (3.18)$$

Donde: PCA es el vector de salida de las componentes principales, Y es el vector de imagen espectral, y W_{PCA} es una matriz de pesos, referido como el kernel de transformación, representado como;

$$W_{PCA} = \begin{bmatrix} e_1^T \\ \vdots \\ e_K^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1K} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{K1} & \cdots & e_{KK} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Donde: e_{ij} es el j^{th} elemento de la i^{th} matriz de covarianza autovector. Este kernel de transformación modifica la matriz covarianza C de la siguiente manera;

$$C_{PCA} = W_{PCA} C W_{PCA}^T = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{K-1} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \lambda_K \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Los ceros fuera de la diagonal principal se refieren a que, los elementos de los vectores PCA no están correlacionados. Se debe tener en cuenta que los λ_K son los valores propios de C que se pueden encontrar como las raíces de la ecuación característica;

$$|C - \lambda I| = 0 \quad (3.21)$$

Donde: I es la matriz identidad.

Los ejes de coordenadas PCA son definidos por los K vectores propios e_K que se puede obtener de la siguiente ecuación vectorial de la matriz, para cada valor propio λ_i es decir,

$$|C - \lambda_i I| e_i = 0, \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, K \quad (3.22)$$

El diagrama de flujo del algoritmo de fusión de datos basado en ACP se muestra en la Figura 3.13. Las imágenes de entrada (imágenes a ser fusionadas) $I_1(x, y)$ e $I_2(x, y)$ son arregladas en dos vectores columna y sus medias empíricas son restadas. El vector resultante tiene una dimensión de $n \times 2$, donde "n" es la longitud del vector de cada imagen. Se calculan los vectores y valores propios de este vector resultante y se calculan los vectores propios correspondientes al mayor valor propio obtenido. Los componentes normalizados P_1 y P_2 , ($P_1 + P_2 = 1$), son calculados a partir de vector propio obtenido. La imagen fusionada es:

$$I_f(x, y) = P_1 I_1(x, y) + P_2 I_2(x, y) \quad (3.23)$$

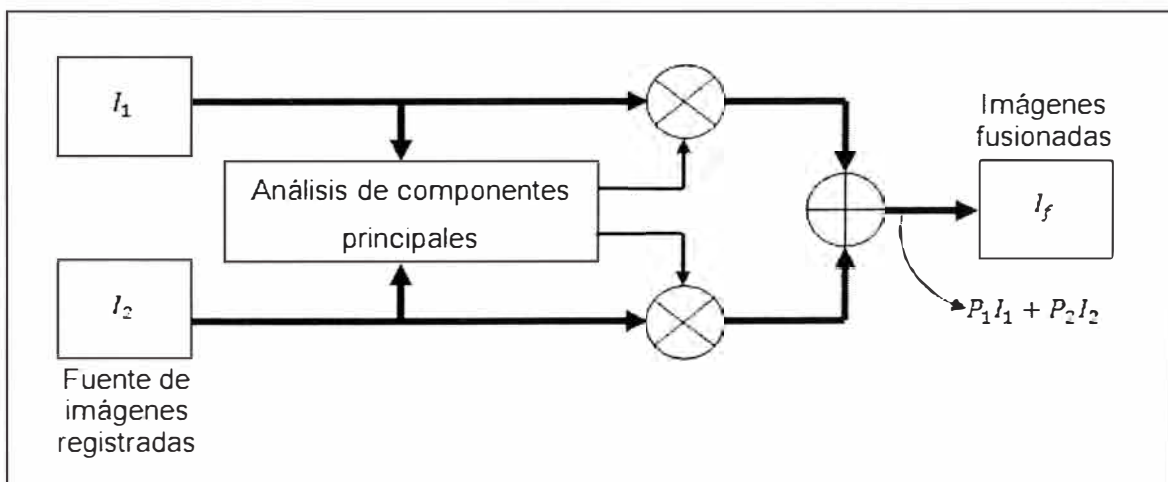


Figura 3.13 Diagrama de bloques de la técnica ACP

d. Conjuntos difusos

La lógica difusa es efectiva cuando los procesos son difíciles de modelar con paradigmas matemáticos clásicos que requieren límites bien definidos. Por tanto es beneficiosa cuando los límites entre conjuntos de valores no están claramente definidos o existe ocurrencia parcial de un evento. Así en la teoría de Conjuntos difusos forman parte de un conjunto en función del grado.

Al establecer normas y conjuntos difusos, la lógica difusa crea una base de control que permite a los gestores construir un sistema de control incluso cuando no se ha entendido completamente el comportamiento matemático del proceso. Esto permite incorporar la indefinición (o ambigüedad) en el proceso de decisión.

De esta manera, una técnica de fusión de datos es útil si existen:

Deficiencias en los modelos matemáticos o falta de capacidad para analizar todos los datos

Sensores de poca calidad o poco representativos

Sistema experto, o un experto, para calibrar el sistema

Mediante su comportamiento se pueden clasificar los diferentes operadores que utilizan esta técnica en: Operadores ICCV, ICCV, y DC. La Tabla 3.1 contiene un resumen de sus cualidades.

e. Inteligencia artificial

Se denomina inteligencia artificial (IA) a la ciencia que desarrolla técnicas para que las máquinas puedan imitar las formas de comprensión, razonamiento y aprendizaje humano. Para alcanzar este propósito existen dos vías:

- 1) Inteligencia artificial convencional y,
- 2) Inteligencia artificial computacional.

d.1 Inteligencia artificial convencional

Se caracterizan por el formalismo y su base estadística, donde se incluyen:

- **Sistemas expertos:** Sistemas diseñados para actuar como un experto humano en un dominio particular o área de conocimiento. En este sentido, pueden considerarse como intermediarios entre el experto humano, que transmite su conocimiento al sistema, y el usuario que lo utiliza para resolver un problema con la eficacia del experto. El Sistema Experto utilizará para ello el conocimiento que tenga almacenado y algunos métodos de inferencia. Simultáneamente, el usuario puede aprender observando el comportamiento del sistema, es decir, los sistemas expertos se pueden considerar al mismo tiempo como un medio de ejecución y transmisión del conocimiento.

- **Red bayesiana:** Modelo basado en las técnicas de Bayes

d.2 Inteligencia artificial computacional

Implica el aprendizaje iterativo basándose en datos empíricos, donde se incluyen:

- **Redes neuronales:** Son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas en una red que colabora para producir un estímulo de salida.

- **Sistemas difusos:** Modelo basado en las técnicas de Conjuntos difusos.

3.4 Fusión de datos en teledetección

La fusión de datos en teledetección es un conjunto de técnicas diversas, cuyo común denominador es la mejora de ciertas características de los datos de teledetección (resolución, cobertura, etc.) a partir de conjuntos de datos que, por sí solos, carecen de ellas [10].

Un ejemplo es la mejora de la resolución espacial de las imágenes pancromáticas SPOT (10 m. de resolución espacial, 1 canal) con las multiespectrales SPOT (3 canales, 20 m. de resolución espacial), consiguiendo imágenes multiespectrales, de tres canales, a una resolución de 10 metros.

Algunos otros métodos que comprenden la fusión de datos son la integración de información vectorial y ráster, de información procedente de diferentes sensores, de datos GPS con cartografía catastral, o bases de datos tradicionales.

Un tipo de datos ráster es, en esencia, cualquier tipo de imagen digital representada en mallas.

El modelo de SIG ráster o de retícula se centra en las propiedades del espacio más que en la precisión de la localización. Divide el espacio en celdas regulares donde cada una de ellas representa un único valor.

En los datos vectoriales, el interés de las representaciones se centra en la precisión de localización de los elementos geográficos sobre el espacio y donde los fenómenos a representar son discretos, es decir, de límites definidos. En un SIG vectorial las características geométricas de las figuras se mantienen. En la Figura 3.13 se ilustra un ejemplo de una interpretación geográfica vectorial y ráster. [11]

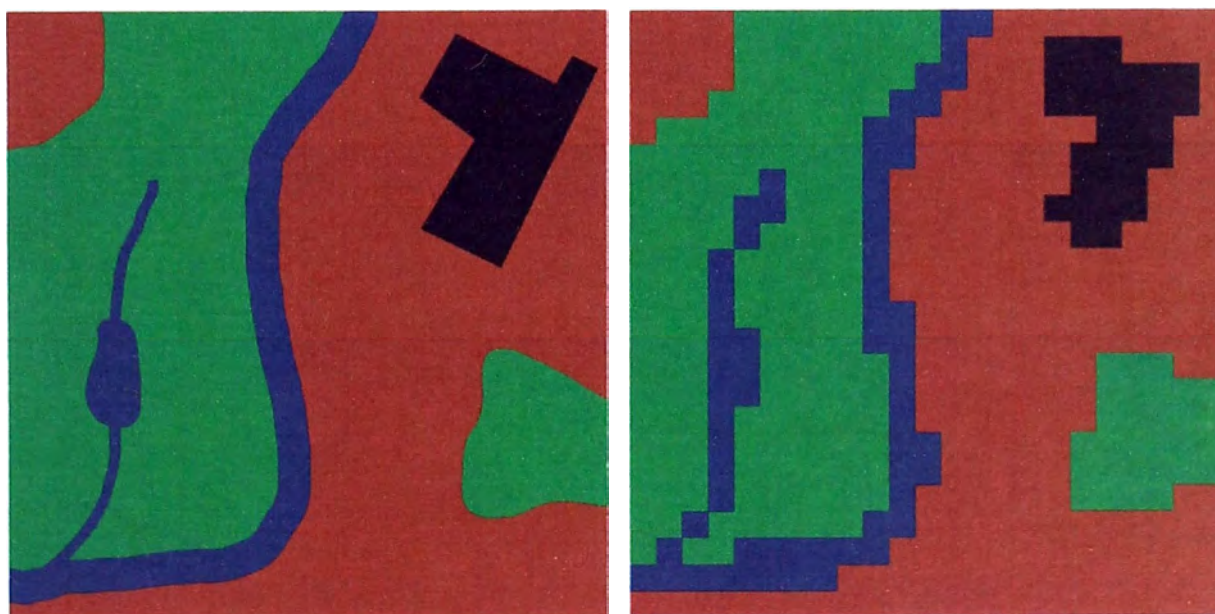


Figura 3.14 Interpretación cartográfica vectorial (izquierda) y ráster (derecha) de elementos geográficos.

Tabla 3.1 Operadores según su comportamiento

Tipo operador	Técnica de Fusión	Lógica matemática	Operador matemático específico	Comportamiento del operador específico
ICCC	Bayes	Probabilística	Producto de probabilidades	Severo
	Conjuntos difusos	Difusa	T-norma T-conorma Medio	Severo Indulgente Prudente
	Dempster-Shafer	Evidencial	Suma ortogonal	Severo
ICCV	Conjuntos difusos	Difusa	Suma simétrica	Los tres según valores a combinar
	Sistemas expertos		Combinación de factores de certeza	Severo (si $x, y > 0$) Indulgente ($x, y < 0$) Prudente (resto de casos)
DC	Conjuntos difusos	Difusa	Operador dependiente del conflicto	Severo si las fuentes son consonantes Prudente si el conflicto es parcial Indulgente si las fuentes son disonantes
	Conjuntos difusos	Difusa	Operador dependiente de la fiabilidad de la fuente	

3.4.1 Aplicaciones de la fusión de datos

La fusión de datos se viene utilizando en observación de la Tierra, pero también en astronomía (para mejorar imágenes tomadas con diferentes sensores y con el objetivo de restaurar imágenes defectuosas), y en otros ámbitos del tratamiento digital de imágenes. En teledetección, la línea de investigación con mayor número de trabajos en la actualidad se inscribe en el campo de la mejora de la resolución espacial de las imágenes de alta resolución espectral, como es el caso de las imágenes NOAA.

Las aplicaciones de estas técnicas se centran en aquellos trabajos que requieren mejorar de alguna manera la discriminación de cubiertas a la mejor resolución espacial posible. Es el caso de extraer información de tipo “usos del suelo” a resolución 5 m utilizando imágenes LANDSAT de 30 m. La resolución LANDSAT, para el caso de estudios de planeamiento urbanístico no es suficiente, mientras que las imágenes de 5 m de un sensor como por ejemplo el sensor IRS-1D únicamente proporciona información fisiográfica, en su canal pancromático. En trabajos de ordenación del territorio en los que se ha utilizado esta técnica se ha verificado que es imprescindible contar con la mejor resolución disponible, esto debido a la necesidad de indicar de manera detallada sobre el territorio una serie de políticas que tienen en cuenta la diversidad del territorio.

3.4.2 El método de fusión de datos mediante entropía (EDF)

En los últimos años se han desarrollado no menos de una docena de métodos para realizar la mejora de la resolución espacial de algunos sensores. Algunas de las metodologías empleadas son las siguientes:

El método IHS: acrónimo de intensidad, brillo y saturación. Se basa en la transformación de la imagen desde el espacio de color RGB hasta otro en el que los ejes son, precisamente, la intensidad, el brillo y la saturación.

El método PCS: Su fundamento teórico es muy parecido al IHS. Consiste en dos procesos sucesivos: la sustitución de la intensidad en el espacio de color – que puede ser vista como la imagen de más alta resolución espacial – por la primera componente principal, por una combinación de ésta con alguna banda de la multiespectral, o por una combinación de la primera y segunda componentes principales. El segundo paso consiste en realizar la transformación inversa para recomponer la imagen, dando como resultado una imagen fusionada.

El método SVR: Cociente Sintético Variable. Se trata más de un método de unión de que fusión.

El método de ARSIS (Accroissement de la Résolution Spatiale par Injection de Structures) o incremento de la resolución espacial por inyección de estructuras. Este es un método que requiere de información con mayor resolución espacial para “inyectarla”, según una estrategia que asume: Tiene que existir una semejanza entre las estructuras fisiográficas examinadas en las bandas espectrales, sin que esto signifique que haya un recubrimiento entre bandas ni que los coeficientes de correlación entre las imágenes sean elevados; las imágenes a fusionar pueden haber sido obtenidas en tiempos diferentes, a condición de que exista semejanza entre la fisiografía.

El método de fusión de datos mediante entropía.- El cual por ser aplicado al caso de

estudio de describe en esta sección.

La base teórica del método que proponen F.J. Tapiador y J.L. Casanova, denominado Entropy Data Fusion (EDF) se basa en el supuesto de que, en teoría, la irradiancia adquirida por un sensor de baja resolución espacial y multiespectral (imagen que se denota como $XS_{L\alpha}$, con α una banda específica) es, en cada píxel y para cada banda, una función, en principio desconocidos, de los valores de radiación correspondiente a los de una imagen de alta resolución espacial que abarca el mismo IFOV (campo de vista instantáneo) denotado como Pan_H . Es decir:

$$XS_{L\alpha} = F_{\alpha}(Pan_H) \quad (3.24)$$

La ecuación (3.18) se puede considerar como una hipótesis. Así, para cada píxel de la imagen $XS_{L\alpha}$ de resolución espacial R_1 , le corresponderá un conjunto de $n = (R_1/R_2)^2$ píxeles de la Pan_H , siendo R_2 la resolución espacial de la Pan_H . F_{α} es lineal, por las características de adquisición de ambos sensores – la radiación que se recibe en un píxel se puede suponer proveniente tan sólo de su correspondiente IFOV – lo que significa que se puede escribir en un nivel de píxel,

$$XS_{L\alpha} = \sum_{i=1}^n p_i \cdot Pan_{Hi} + C \quad (3.25)$$

Siendo C un valor que estará en función de la relación que exista entre las longitudes de onda a la que los sensores son sensibles y p_i un grupo de coeficientes. En base a la hipótesis anterior se puede suponer que la sumatoria de todos los coeficientes p_i , desde $i = 1$ hasta $i = n$, tiene un valor de 1. El número de posibles soluciones de esta ecuación de n incógnitas es muy elevado. Ahora bien, sólo una muy pequeña parte de éstas, estarán de acuerdo con la restricción:

$$\langle XS_{L\alpha} \rangle = \sum_{i=1}^n p_i \cdot Pan_{Hi} + C \quad (3.26)$$

Donde $\langle XS_{L\alpha} \rangle$ es el valor medio de $XS_{L\alpha}$, una restricción que implica la conservación de las propiedades radiométricas de la imagen de más baja resolución espacial en el grupo. Por otra parte, de entre aquellas que satisfacen la restricción, sólo habrá un conjunto de p_i con los datos iniciales que serán los más probables, en el sentido de que ofrezca un mayor número de opciones posibles. Para la determinación del parámetro “ p_i ” se conceptualiza a este conjunto como una distribución de probabilidad. Es fácil comprobar cómo se satisfacen las condiciones necesarias. Se define también la magnitud fusión de la información por entropía, de la siguiente manera:

$$S = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) \quad (3.27)$$

Donde: k es una constante, S estima la incertidumbre del sistema. Cuanto mayor sea la incertidumbre, mayor número de posibilidades de que la distribución sea la correcta. El problema de la búsqueda de la distribución de probabilidad que mejor se ajuste a la información que se tiene se reduce entonces a resolver la ecuación $\max(-k \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i))$ sujeto a las condiciones:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i = 1 \\ \langle X S_{L\alpha} \rangle = \sum_{i=1}^n p_i \cdot P a n_{H i} \end{cases} \quad (3.28)$$

Cabe señalar que lo que se intenta es extraer el máximo de la información posible a partir de los datos con los que contamos. Si se dispone de más información, ésta podría ser incluida como restricciones adicionales, lo cual, por otra parte, torna compleja la resolución del sistema. En este sentido, el método es óptimo.

El planteamiento inicial de Jaynes nace en la física estadística como un medio de búsqueda de la distribución de probabilidad de un sistema termodinámico en equilibrio. El mismo, en trabajos posteriores, señala la fácil transferencia del método de máxima entropía y de su lógica subyacente a campos tan alejados como la astronomía o la economía, y por supuesto en la física.

Con la finalidad de maximizar la ecuación (3.27) sujeto a las condiciones de la ecuación (3.28) es conveniente utilizar el método de los multiplicadores de Lagrange, que es la que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} L(p_1, \dots, p_n, \lambda_1, \lambda_2) &= -k \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i) + \lambda_1 \left[\left(\sum_{i=1}^n p_i \right) - 1 \right] \\ &+ \lambda_2 \left[\left(\sum_{i=1}^n P a n_{H i} p_i \right) - \langle X S_{L\alpha} \rangle \right] \end{aligned} \quad (3.29)$$

Siendo λ_1 y λ_2 los multiplicadores de Lagrange. Las condiciones del extremo condicionado para S y las dos restricciones son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial p_i} \Big|_{p_j \neq p_i, \lambda_1, \lambda_2} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} \Big|_{p_j, \lambda_2} &= 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} \Big|_{p_j, \lambda_1} &= 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

Resolviendo de la función de Lagrange:

$$\frac{\partial L}{\partial p_i} = -k(\ln p_i + 1) + \lambda_1 + \lambda_2 P a n_{Hi} = 0 \quad (3.31)$$

Hallando la expresión para p_i se tiene:

$$p_i = \exp((\lambda_1/k) - 1) \exp((\lambda_2/k) - P a n_{Hi}) \quad (3.32)$$

Para solucionar esta ecuación se define:

$$\ln Z \equiv 1 - \frac{\lambda_1}{k} \quad (3.33)$$

$$\beta \equiv \frac{\lambda_2}{k}$$

Esto lleva a lo siguiente:

$$p_i = \frac{e^{-\beta P a n_{Hi}}}{Z} \quad (3.34)$$

Obteniéndose el sistema de ecuaciones exponenciales que se presenta en la ecuación (3.29), donde Z es la partición del sistema.

La resolución analítica de éste sistema de ecuaciones requiere métodos numéricos, es aquí donde radica la dificultad de la aplicación del método de máxima entropía. Una vez encontradas las soluciones, basta con sustituir las probabilidades en la ecuación (3.26) para obtener las probabilidades a priori a asignar a la imagen resultado de la fusión. La aplicación del teorema de Bayes es entonces evidente.

$$\begin{cases} Z = \sum_i e^{-\beta P a n_{Hi}} \\ Z \langle X S_{L\alpha} \rangle = \sum_i P a n_{Hi} e^{-\beta P a n_{Hi}} \end{cases} \quad (3.35)$$

CAPÍTULO IV

FUSIÓN DE DATOS BASADO EN ENTROPIA (EDF) PARA TELEDETECCIÓN

El ordenamiento territorial es una herramienta fundamental para el desarrollo, es una normativa con rango de ley, que permite regular el uso del territorio, definiendo los usos posibles para las diversas áreas en que se ha dividido el territorio, ya sea: a nivel de país o como parte del mismo. En general, se reserva el término ordenamiento territorial para definir la normativa; mientras que el proceso y la técnica para llegar a dicha normativa, se conocen como ordenación del territorio.

En el caso del Perú, el ordenamiento territorial se define como un instrumento que forma parte de la política de estado sobre el desarrollo sostenible: “El ordenamiento ambiental del territorio es un instrumento que forma parte de la política de ordenamiento territorial. Es un proceso técnico – político orientado a la definición de criterios e indicadores ambientales para la asignación de usos territoriales y la ocupación ordenada del territorio”.

En este panorama, en este capítulo se presenta un estudio de caso de ordenamiento territorial para un área determinada. El propósito consiste en mejorar la resolución espacial, utilizando como fuentes de datos las imágenes satelitales de dos satélites con resoluciones distintas. Para este propósito, se hace uso de la técnica de fusión de datos basado en la entropía (EDF, Entropy Data Fusion). Este tipo de aplicación tiene como objetivo el ordenamiento territorial relacionado a la confección de mapa de usos del suelo.

4.1 Descripción de los sensores utilizados

En la aplicación de fusión de datos en el ordenamiento territorial se han utilizado las imágenes de los sensores

- Sensores satelitales IRS – 1D Pancromático y Landsat – TM, para la confección del mapa de usos del suelo.
- Sensor satelital Landsat – ETM+, para el seguimiento de la vegetación.

A continuación se describen las características más importantes de los sensores utilizados para esta aplicación.

4.1.1 Sensor IRS – 1D Pancromático

El satélite IRS – 1D fue desarrollado por ISRO (Indian Space Research Organization).

El objetivo principal de los satélites IRS, es la de obtener una adquisición sistemática y repetitiva de la superficie de la tierra en condiciones de iluminación constantes. En la Figura 4.1 se ilustra el satélite indio de percepción remota (IRS-1D).

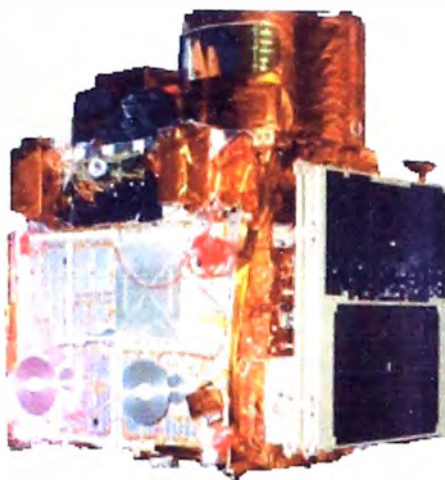


Figura 4.1 Satélite IRS – 1D

El satélite IRS-1D opera en una órbita polar (circular) sincronizada con el sol, con una inclinación de 98.69° , a una altitud de 817 km. El satélite, necesita 101.35 minutos para completar una vuelta alrededor de la tierra, completando unas 14 vueltas al día. La tierra completa, es cubierta en un periodo de 24 días. Cada órbita sucesiva, sufre un desplazamiento de 2820 km a la altura del ecuador. Cuando el satélite pasa por el ecuador, son las 10:30 am, hora local. [16]. La Tabla 4.1 contiene las características de los sensores en el satélite IRS, y en particular al sensor IRS – 1D Pancromático.

Tabla 4.1 Características de los sensores del satélite IRS

IRS (Indian Remote Sensing Satellite)				
Imágenes desde diciembre de 1995				
Sensores		PANCROMÁTICO	LISS-III	WIFS
Resolución (m/px)		5.8	23.5	188
Bandas Espectrales	#B1	Pancromático	500-750 nm	
	#B1	Verde	590-590 nm	
	#B1	Rojo	620-680 nm	620-680 nm
	#B1	Infrarrojo	770-860 nm	770-860 nm
Ancho de barrido		70 km	141 km	810 km

Los satélites IRS son los de mayor constelación de satélites civiles de teledetección, proporcionando imágenes en un gran rango de resoluciones espaciales y espectrales, lo

que se traduce en una gran variedad de aplicaciones: agricultura, gestión de recursos hídricos, desarrollo urbano, medio ambiente, bosques, océanos, etc.

4.1.2 Sensor TM (Thematic Mapper)

En la segunda generación del programa Landsat se introdujo un nuevo tipo de sensor, denominado Thematic Mapper (TM), diseñado para la cartografía temática, el cual opera en siete bandas espectrales diferentes. Estas bandas fueron elegidas especialmente para el monitoreo de vegetación a excepción de la banda 7 que se agregó para aplicaciones geológicas.

Banda 1: (0,45 a 0,52 micrones – azul) Diseñada para penetración en cuerpos de agua, es útil para el mapeo de costas, para diferenciar entre suelo y vegetación y para clasificar distintos cubrimientos boscosos, por ejemplo coníferas y latifoliadas. También es útil para diferenciar los diferentes tipos de rocas presentes en la superficie terrestre.

Banda 2: (0,52 a 0,60 micrones – verde) Especialmente diseñada para evaluar el vigor de la vegetación sana, midiendo su pico de reflectancia (o radiancia) verde. También es útil para diferenciar tipos de rocas y, al igual que la banda 1, para detectar la presencia o no de limonita.

Banda 3: (0,63 a 0,69 micrones – rojo) Es una banda de absorción de clorofila, muy útil para la clasificación de la cubierta vegetal. También sirve en la diferenciación de las distintas rocas y para detectar limonita.

Banda 4: (0,76 a 0,90 micrones – infrarrojo cercano) Es útil para determinar el contenido de biomasa, para la delimitación de cuerpos de agua y para la clasificación de las rocas.

Banda 5: (1,55 a 1,75 micrones – infrarrojo medio) Indicativa del contenido de humedad de la vegetación y del suelo. También sirve para discriminar entre nieve y nubes.

Banda 6: (10,40 a 12,50 micrones – infrarrojo termal) El infrarrojo termal es útil en el análisis del stress de la vegetación, en la determinación de la humedad del suelo y en el mapeo termal.

Banda 7: (2,08 a 2,35 micrones – infrarrojo medio) Especialmente seleccionada por su potencial para la discriminación de rocas y para el mapeo hidrotermal. Mide la cantidad de hidroxilos (OH) y la absorción de agua.

Estas siete bandas pueden combinarse de a tres o más, produciendo una gama de imágenes de color compuesto que incrementan notablemente sus aplicaciones, especialmente en el campo de los recursos naturales. El mapeador temático (TM) tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, el MSS, y mejor resolución espacial, ya que el tamaño del píxel en todas las bandas excepto la 6, es de 30 metros. Esto

permite la clasificación de zonas tan pequeñas como de 2.5 o 3 hectáreas. La banda 6, que es una banda termal, tiene un píxel de 120 metros en el terreno, donde cada imagen cubre un área de 185 x 185 Km [17].

4.1.3 Sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper)

El ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) es un sensor multiespectral radiométrico a bordo del satélite Landsat 7. El sensor ETM+ incorpora una banda pancromática (0.5 a 0.9 μm) con una resolución espacial de 15 m, y la banda infrarroja termal (banda 6) es de 60 metros. El tamaño aproximado de la escena es de 170x183 km, lo que permite obtener ampliaciones a una escala de hasta 1:25 000. La Tabla 4.2 contiene las diferencias de resolución espectral entre el sensor TM (Thematic Mapper) del Landsat 5 y el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) del Landsat 7. Los valores están expresados en micrones, representan los límites de longitudes de onda a los que son sensibles cada banda espectral [18].

Tabla 4.2 Cuadro comparativo entre el sensor TM y ETM+

SENSOR	Límites de longitud de onda (μm)	
	TM	ETM+
Banda 1	0.45 – 0.52	0.45 – 0.52
Banda 2	0.52 – 0.60	0.53 – 0.61
Banda 3	0.63 – 0.69	0.63 – 0.69
Banda 4	0.76 – 0.90	0.78 – 0.90
Banda 5	1.55 – 1.75	1.55 – 1.75
Banda 6	10.4 – 12.5	10.4 – 12.5
Banda 7	2.08 – 2.35	2.09 – 2.35
Banda 8		0.52 – 0.90

4.2 Ordenamiento Territorial basado en Teledetección

Con la finalidad de realizar el ordenamiento territorial basado en teledetección, se hace uso de las informaciones obtenidas de sensores multiespectrales. Estas informaciones son combinadas mediante el algoritmo de fusión de datos basado en la entropía de la información en la probabilidad a priori y en la interpretación física de Jaynes (EDF, Entropy Data Fusion). El objetivo de esta fusión de imágenes consiste en mejorar la resolución espacial de un territorio para el ordenamiento territorial, de confección de mapa de usos del suelo. La confección del mapa de usos del suelo es primordial para establecer las áreas protegibles, las áreas de crecimiento urbano, los espacios singulares, los análisis de riesgos naturales, etc., y para ello la información debe ser la más actualizada posible. Para realizar la fusión de datos, se hace uso de las

técnicas de fusión a nivel de datos, en el cual, son fusionados los datos que son directamente capturados (señal de pixel). Para este caso son utilizados imágenes de los sensores satelitales IRS 1-D Pancromática (con resolución espacial de 5m) y Landsat ETM+ (con resolución espacial 30 m). En la Figura 4.2, se ilustra la arquitectura para la fusión de imágenes.

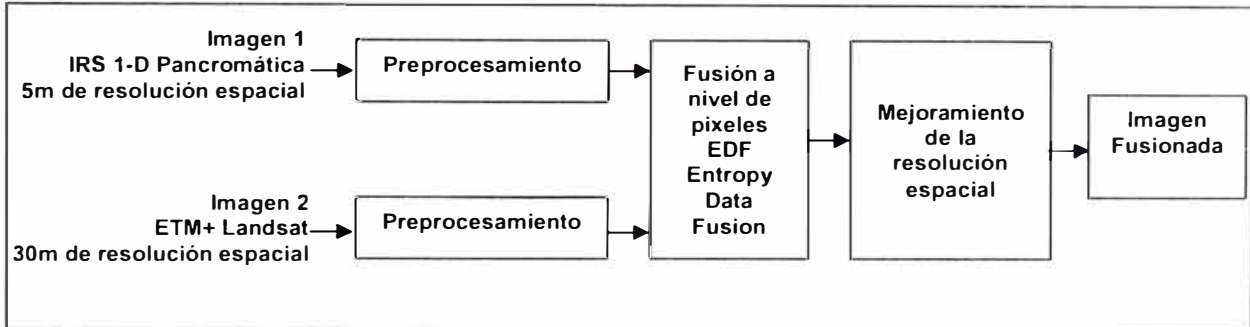


Figura 4.2 Arquitectura para la fusión de imágenes

El algoritmo utilizado para la fusión de imágenes es el basado en la maximización de la entropía (EDF, Entropy Data Fusión) el cual hace uso de los multiplicadores de Lagrange para así encontrar la distribución probabilística discreta con máxima entropía. Este algoritmo de fusión de datos mediante entropía se describe con detalle en el capítulo anterior, en la sección 3.4.2.

Para el caso de la aplicación que se presenta en este informe, se tienen dos imágenes obtenidas por los sensores satélites, Landsat ETM+ con resolución espacial de $R_1 = 30\text{m}$ y el sensor IRS 1-D Pan con resolución espacial de $R_2 = 5\text{m}$, así para cada pixel de la imagen le corresponderá $n = (30/5)^2 = 36$ pixeles de la radiación, por lo que para un nivel se pixel se tiene:

$$XS_{L\alpha} = \sum_{i=1}^{36} p_i \cdot Pan_{Hi} + C \quad (4.1)$$

Según la ecuación (4.1), el cual tiene 36 variables cuya suma debe ser igual a 1, tiene una gran cantidad de soluciones, tal como se había mencionado anteriormente, de los cuales sólo algunas satisfarán la restricción, definida por:

$$\langle XS_{L\alpha} \rangle = \sum_{i=1}^{36} p_i \cdot Pan_{Hi} + C \quad (4.2)$$

Para determinar el valor de los "p_i" se conceptualiza a este conjunto como una distribución de probabilidad y la incertidumbre del sistema, que está definida por:

$$S = -k \sum_{i=1}^{36} p_i \ln(p_i) \quad (4.3)$$

Donde k es una constante.

Es sabido que cuanto más grande sea el valor de la incertidumbre, mayor será el número de posibilidades de que la distribución sea correcta y para ello es necesario resolver la ecuación $\max(-k \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_i))$, haciendo uso de los multiplicadores de Lagrange mostradas en la ecuación (3.24) de donde se llega a obtener una función para p_i , tal como se define a continuación:

$$p_i = \frac{e^{-\beta P a n_{Hi}}}{Z} \quad (4.4)$$

A partir de estas informaciones se define las ecuaciones exponenciales:

$$\begin{cases} Z = \sum_i e^{-\beta P a n_{Hi}} \\ Z \langle X S_{L\alpha} \rangle = \sum_i P a n_{Hi} e^{-\beta P a n_{Hi}} \end{cases} \quad (4.5)$$

El método adoptado para resolver el sistema fue la transformación del sistema en un polinomio algebraico, junto con su posterior resolución en el campo complejo. El teorema fundamental del álgebra dice que siempre habrá al menos una solución en \mathbb{C} . Un espacio de probabilidades complejo fue definido por lo tanto, y una aplicación biyectiva se estableció entre éste y el espacio de probabilidad inicial. La búsqueda efectiva de las raíces del polinomio se realiza mediante métodos numéricos utilizando el método de Müller; una vez encontrada las soluciones se reemplaza en la ecuación (3.26) para obtener las probabilidades a priori a asignar a la imagen resultado de la fusión. Como se puede observar, la transferencia de conceptos en el campo de la fusión de imágenes es evidente. Con el objetivo de ilustrar la efectividad del algoritmo EDF (Entropy Data Fusion) para la fusión de imágenes, se combina las informaciones de dos imágenes de los sensores satelitales IRS 1-D pancromática y Landsat ETM+, como se ilustra en la Figura 4.3. El algoritmo de fusión combina los diferentes intervalos de longitudes de onda para tener una resolución idónea para excluir la mayoría de los elementos relevantes del espacio geográfico.

En la Figura 4.3.a se ilustra la imagen satelital obtenida por el satélite IRS 1-D con una cámara pancromática con una resolución espacial de 5m, adquirida de forma sistemática y repetitiva en condiciones de iluminación constante; mientras que en la Figura 4.3.b se ilustra la imagen de aproximadamente 30 000 km², obtenida por el satélite Landsat con el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) el cual tiene incorporada una banda pancromática que permite ampliaciones a una escala de hasta 1:25 000. Ambas imágenes muestran algunos datos redundantes que son complementadas al momento de ser fusionadas en una sola imagen, obteniéndose una imagen multiespectral de 5m de resolución espacial, que como se puede observar en la Figura 4.4 se obtiene una mejora considerable en la imagen.

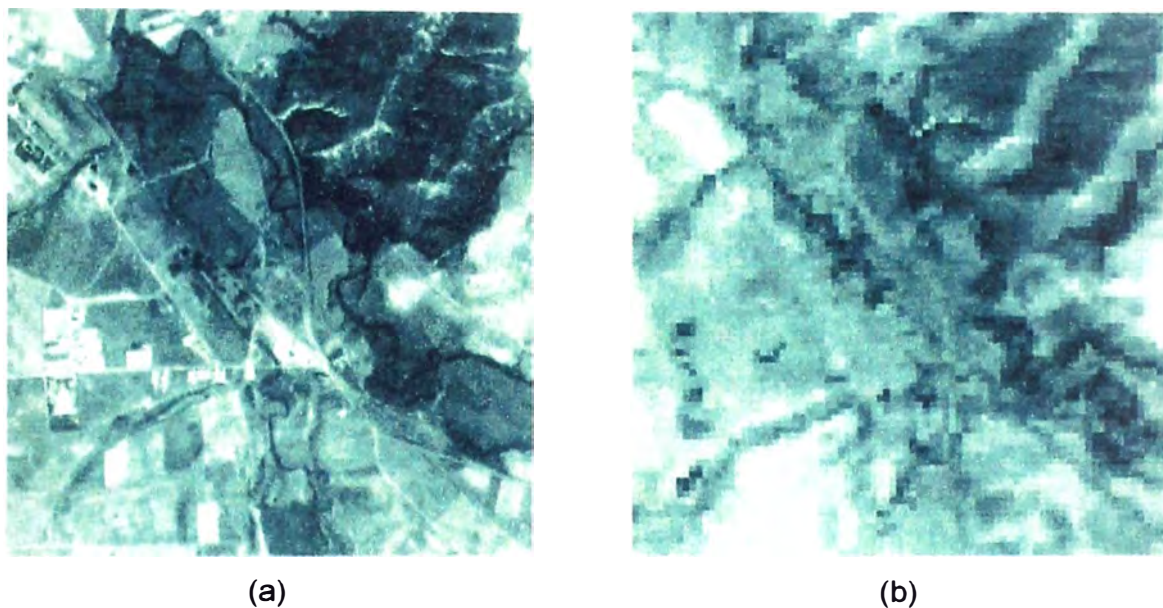


Figura 4.3 a) Sensor satelital IRS 1-D pancromática (5m de resolución espacial),
b) Sensor satelital Landsat ETM+ (30m de resolución espacial)

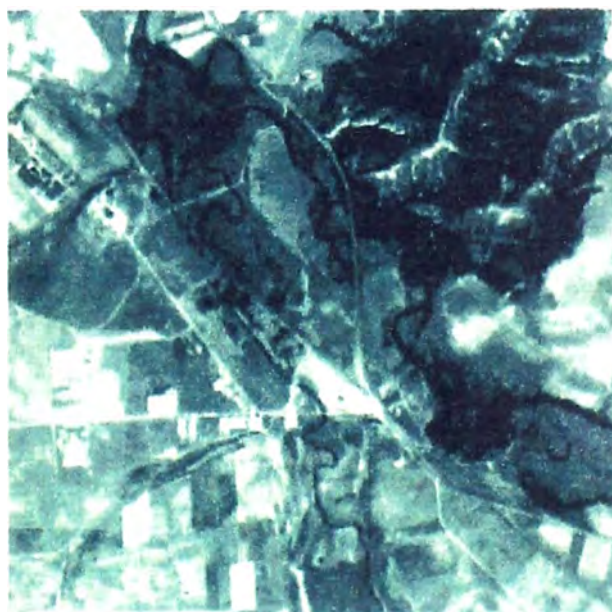


Figura 4.4 Imagen multiespectral (5 metros de resolución espacial) fusionada con la técnica de máxima entropía

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones obtenidas en el presente informe son las siguientes:

1. Con la finalidad de mejorar la discriminación espectral de las de alta resolución espacial se ha utilizado el método de Fusión de Datos por Entropía (EDF) pues tiene una base estadística que hace mayor uso de la información disponible, a priori, y en este sentido puede decirse que es óptimo.
2. El método de Fusión de Datos por Entropía (EDF) en aras de la simplicidad, se basa en la búsqueda de la distribución de probabilidad máxima según el método de Jaynes de máxima entropía y ofrece dos características principales: su base teórica y su aplicabilidad a diferentes sensores.
3. Los resultados prácticos de la fusión de imágenes Landsat ETM+ con imágenes IRS 1 – D también se han presentado, haciendo referencia a los altos requerimientos de cómputo de los algoritmos y las aplicaciones útiles que se pueden derivar de los resultados en términos de la discriminación de la tierra que cubre (mejora espectral) y en el aspecto visual de las imágenes de foto – interpretación.
4. Las ventajas que nos ofrece la fusión de datos de múltiples sensores se basan en la amplia cobertura que se puede proporcionar, la rapidez de generación de datos, su objetividad, y en la alta resolución de los productos.
5. Las técnicas de fusión de datos en teledetección serían de enorme utilidad para el Estado Peruano, administrador de una región caracterizada por su variedad geográfica y climática (costa, sierra y selva y las micro regiones), con diversidad de recursos (flora, fauna, minerales, hidrocarburos).

Las recomendaciones que surgen del presente informe son las siguientes:

1. Debería promoverse el aprendizaje de estas técnicas a nivel de pregrado a fin de orientar al estudiante al desarrollo de aplicaciones que abarquen no sólo a la robótica, sino también al ámbito de la inteligencia artificial.
2. Cada aplicación forzaría al entendimiento de los sensores (percepción remota, diagnósticos médicos, video vigilancia, etc.)

ANEXO A
GLOSARIO DE TÉRMINOS

AIS	Automatic Identification System
CCD	Charge-coupled devices
EDF	Entropy Data Fusion
GIAA	Grupo de Inteligencia Artificial Aplicada
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IA	Inteligencia Artificial
ICCC	Independiente del Contexto con Comportamiento Constante
ICCV	Independiente del Contexto con Comportamiento Variable
IDL	Interactive Data Language
IMO	Organización Marítima Internacional
JDL	Joint Directors of Laboratories
LVDT	Lineal Variable Differential Transformer
NOAA	National Oceanic Atmospheric Administration
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
RTD	Detectores de temperatura resistivos
RVDT	Rotary Variable Differential Transformer
PSD	Position Sensitive Detector
SAR	Radar de Apertura Sintética
SeaWIFS	Sea-viewing Wide Field – of – view Sensor
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SIMOM	Sistema de Monitorización Oceanográfica para el área de la Macaronesia
SOLAS	Safety of Life at Sea
UC3M	Universidad Carlos III de Madrid
VRP	Variable – reluctance pressure

BIBLIOGRAFÍA

- [1] David. L. Hall, James Llinas, "Handbook of multisensor data fusion", CRC Press LLC, 2001, ISBN 0-8493-2379-7.
- [2] Curso Ing. Ingmar Ramírez., <http://www.une.edu.ve/~iramirez/robotica/sensores.ppt>
- [3] David Abeijón, Francesco Soriguera y Leif Thorson "Fusión de datos para obtención de tiempos de viaje en carretera"
<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4376/28/03.pdf>
- [4] Carlos Alberto Juárez Alonso con el tema "Fusión de Datos: Imputación y Validación", http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0725105-143853/
- [5] Fraden, Jacob, "Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications", American Institute of Physics, (AIP), 2004, ISBN:1563961083
- [6] F.J. Tapiador, J.L. Casanova, "Aplicaciones de la Fusión de Datos en la ordenación territorial", <http://www.aet.org.es/congresos/ix/Lleida111.pdf>
- [7] J. Pérez-Marrero, et al, "Una herramienta para la fusión de datos oceanográficos obtenidos mediante satélites", Congreso nacional de teledetección 2005, <http://www.aet.org.es/congresos/xi/ten35.pdf>
- [8] José M. Molina, et al, "Robust Sensor Fusion in Real Maritime Surveillance Scenarios", GIAA, 2010.
http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/9326/3/robust_molina_Fusion10_2010.pdf
- [9] Federico Castanedo Sotela, "Fusión de Datos Distribuida en Redes de Sensores Visuales Utilizando Sistemas Multi-Agente": Tesis Doctoral, UC3M, mayo 2010.
<http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/9495/1/Castanedo-thesis-Phd.pdf>.
- [10] F. J. Tapiador, J. L. Casanova, "La Fusión de Datos en Teledetección".
http://www.aet.org.es/revistas/revista15/AET15_1.pdf
- [11] http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Información_Geográfica
- [12] IDL, "Interactive Data Language", Revista Internacional de ciencias de la Tierra.
http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=348idl
- [13] SeaWiFS, <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/>
- [14] Núcleo de comunicaciones y Control, <http://www.nucleocc.com/>

- [15] IMO, International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974
<http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-%28SOLAS%29,-1974.aspx>
- [16] GeoService Perú S.A.C., www.gsp-peru.com
- [17] Imágenes satelitales LANDSAT, <http://www.imagenesgeograficas.com/Landsat.html>
- [18] Ficha técnica resumida - Landsat 7 ETM +, <http://www.bgeo.com.py/landsat7.html>
- [19] <http://www.i-csrs.org/Volumes/gisars/vol.1/vol.1.1.2.July.10.pdf>