



UNIVERSIDAD DE SONORA  
Departamento de Geología

Los Fundamentos Teóricos de los Sensores Remotos y la  
Interpretación Geológica de una Imagen Landsat Path 36-Row 39

TESIS

Que para obtener el Título de

GEOLOGO

Presenta

Inocente Guadalupe Espinoza Maldonado

Hermosillo, Sonora

Noviembre de 1989



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARA MI GRANDEZA  
BIBLIOTECA DE CIENCIAS  
EXACTAS Y NATURALES

583  
Biblioteca Depto.  
de Geología



# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



Hermosillo, Son., a septiembre 15 de 1989.

ING. RICARDO AMAYA MARTINEZ  
Coordinador Ejecutivo  
Depto. de Geología  
P r e s e n t e .



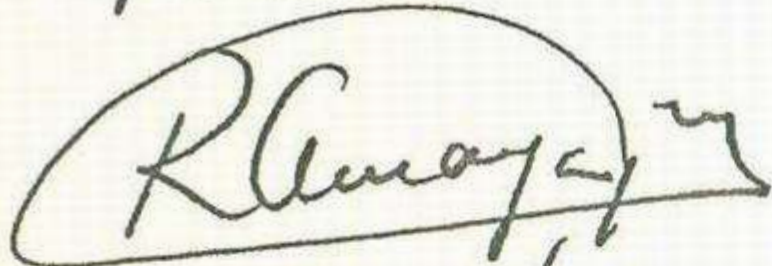
BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

UNIVERSIDAD DE SONORA  
UNIVERSITY OF SONORA

Por medio de la presente me permito someter a su consideración el tema de tesis del pasante de Geólogo INOCENTE GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO (NUM. EXP. 7911084-4), titulada: "FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS SENSORES REMOTOS Y LA INTERPRETACION GEOLOGICA DE UNA IMAGEN LANDSAT (T.M.) (PATH 36 - ROW 39)".

Agradeciendo de antemano la atención que se sirva prestar a la presente.

Recibi

  
Sept 15/89.

A T E N T A M E N T E



JUAN JOSE PALAFOX REYES  
DIRECTOR DE TESIS

c.c.p. M.C. Mariano Morales, Secretario Académico.  
c.c.p. Interesado  
c.c.p. Director de Tesis  
c.c.p. Archivo





Departamento de Geología

Octubre 17, 1989.

GEOL. JUAN JOSE PALAFOX REYES  
Asesor de Tesis  
Departamento de Geología  
P r e s e n t e

**Biblioteca Depto.  
de Geología**

Por este conducto, informo a usted, que ha sido aprobado el tema de tesis:

"FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS SENSORES REMOTOS Y LA INTERPRETACION GEOLOGICA DE UNA IMAGEN LANDSAT (T.M.) (PATH 36-ROW-39)",

Para que sea desarrollado por el Pasante de Geólogo:

INOCENTE GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO

Sin otro en particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

*R Amaya*  
ING. RICARDO AMAYA MARTINEZ  
Coordinador Ejecutivo



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARA MI GRANDEZA  
BIBLIOTECA DE CIENCIAS  
EXACTAS Y NATURALES

C.c.p. Interesado  
Archivo

RAM\*ag



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARA MI GRANDEZA  
DEPARTAMENTO DE  
GEOLOGIA





## Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

"FUNDAMENTOS TEORICOS DE LOS SENSORES REMOTOS  
Y LA INTERPRETACION GEOLOGICA DE UNA IMAGEN  
LANDSAT (T.M.) (PATH 36 - ROW 39)"

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

INOCENTE GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

*M. Morales Montano*  
GEOL. MARIANO MORALES MONTAÑO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

*Alma Patricia Samano Tirado*  
ING. ALMA PATRICIA SAMANO TIRADO

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

*Juan Jose Palafox Reyes*  
GEOL. JUAN JOSE PALAFOX REYES

A T E N T A M E N T E  
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"

ING. RICARDO AMAYA MARTINEZ  
Coordinador Ejecutivo

RAM\*ag



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARA MI GRANDEZA  
BIBLIOTECA DE CIENCIAS  
EXACTAS Y NATURALES



## P A R T E I

### Resumen

1. Introducción
  - 1.1 Presentación del trabajo.
  - 1.2 Trabajos previos.
  - 1.3 Agradecimientos.
2. Generalidades.
  - 2.1 Area de estudio (mapa de localización).
  - 2.2 Vias de acceso.
  - 2.3 Clima, flora y fauna.
3. Fisiografía y geomorfología.
4. Hidrografía.
5. Antecedentes bibliográficos.
  - 5.1 Bosquejo Geológico Regional.
  - 5.2 Afloramientos de rocas de edad Jurásica reportados en Sonora.
6. Metodología (Método de trabajo)
7. Geología estructural.
8. Tectónica.
9. Conclusiones y recomendaciones.
10. Bibliografía.



## R E S U M E N

Al analizar el drenaje principal, se observa que aproximadamente en el centro de la imagen destaca un fuerte lineamiento del Rio Magdalena, localizado en la sección Caborca - Trincheras, con un rumbo general de NW-SE, este mismo lineamiento se prolonga hacia la región de Cucurpe (SE) y hacia la región del Desierto de Altar (NE). A este gran rasgo morfo-estructural se le denomina "Lineamiento Caborca".

El "Lineamiento Caborca" marca la separación de dos grandes dominios: Un dominio norte, con un tren de orientación de sus rasgos morfo-estructurales predominantemente NE-SW y otro dominio sur, donde la orientación que predomina es de NW-SE.

Destacan dos rasgos morfo-estructurales mayores en el dominio sur: El "Lineamiento la Vibora" con un rumbo general aproximado de NW 60 SE, y el "Lineamiento el Viejo" con un rumbo de NW 30 SE, esto puede ser observado en el plano estructural.



## 1.- Introducción.

### 1.1 Presentación del trabajo.

El presente trabajo fué financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y se encuentra enmarcado dentro del proyecto "Cartografía del Jurásico en el Estado de Sonora utilizando imágenes y tratamiento de datos del sensor Mapeador Temático (TM) del satélite Landsat IV". También participó en el financiamiento de este proyecto el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora.

El propósito de este trabajo, es culminar con el ciclo de educación profesional a nivel licenciatura, presentándolo como una opción al título de Geólogo, siendo éste un requisito académico-administrativo. Los propósitos de carácter investigativo y científico, en general son: Presentar los fundamentos teóricos, aplicaciones, extracción de información, interacción con los cuerpos naturales de la energía electromagnética que es captada por los sensores remotos, el procesamiento digital de la información captada y la presentación de dicha información, que es captada por sensores desde satélites. Los objetivos particulares son los siguientes: Tratar de establecer (desarrollar) una metodología en la interpretación de imágenes de sensores remotos y aplicar esta metodología en la investigación geológica, en particular, sobre la cartografía del Jurásico en la parte Centro-Occidental de Sonora y tratar de elaborar un plano geológico regional a escala 1:250 000. Cabe aclarar, que en este trabajo no se abordarán problemas de carácter estratigráfico y estructural.





## 1.2 Agradecimientos.

En la realización de este trabajo intervinieron un gran número de personas, que de alguna manera colaboraron directa o indirectamente, de tal forma, que no es posible mencionarlas a todas, pero el trabajo de todas y de cada una de ellas es igual de valioso.

De una manera muy especial: agradezco al Geol. Juan José Palafox Reyes por su asesoría en el desarrollo de este trabajo. De igual manera agradezco a los Maestros Geol. Mariano Morales Montaño y Geol. Alma Patricia Zamano Tirado por haber aceptado revisar este trabajo de tesis. Al Consejo Directivo del Departamento de Geología. Así mismo agradezco a los Geólogos Yolanda Torres López e Ismael Minjares por sus comentarios y observaciones. También Agradezco al Coordinador Ejecutivo del Departamento de Geología Ing. Ricardo Amaya por el apoyo brindado a este trabajo.

A los Geólogos Alfredo Martínez Bonillas y Bernardo Rodríguez Ramos por haber colaborado con su experiencia en los trabajos de campo y, a los alumnos Rolando Franco y Rodolfo Favián por su valiosa cooperación.

Sobre todo y de una manera muy especial a la Universidad de Sonora y al Departamento de Geología por sus enseñanzas y apoyo que me brindaron en mi vida de estudiante universitario y en el desarrollo de este trabajo de tesis.



## DEDICATORIA

A Dios: Por haberme permitido el favor de poder terminar con esta etapa de mi vida.

A mi Madre: Manuela Maldonado que su apoyo y ejemplo fueron la fuerza que me ayudo para seguir adelante.

A mi Padre: Luis Espinoza que su ejemplo fué un reto a vencer.

A mi Esposa: Santa Morales

A mis Hermanos: Maria Elena, Mario, Gilberto y Luis (+).

A todos ellos mi más profundo y sincero agradecimiento.



El autor de esta tesis hace un especial reconocimiento y agradece a CONACYT por el financiamiento otorgado para la realización de este proyecto.



### 1.3 Trabajos Previos (de sensores remotos) en Sonora.

La utilización de las imágenes obtenidas por sensores remotos desde satélites en México, comenzó poco después del lanzamiento del satélite Landsat 1. Desde entonces, las aplicaciones de estas imágenes han crecido hacia la mayor parte de las áreas de investigación en usos de suelo y prospección de recursos naturales. Las aplicaciones en la investigación geológica, se hallan en los importantes dominios de la prospección minera y petrolera. De hecho, las grandes compañías mineras y petroleras a escala mundial, son las que más demanda tienen por las imágenes de satélite para los fines de prospección ya antes mencionados.

Uno de los primeros trabajos realizados en Sonora, en lo referente a percepción remota, fue el hecho por el Ing. G. P. Salas (1976), Tectónica del estado de Sonora, basado en la interpretación sobre imágenes del ERTS-1 y publicó un mapa de escala 1: 1 250 000.

J. F. Chaulot-Talmon, para su trabajo de tesis doctoral, también utilizó imágenes de satélite, abarcando un área comprendida entre Hermosillo-Chihuahua y el Norte de Sinaloa. El trabajo lo presentó a la Université de Paris Sud en mayo de 1984.

J. R. Gallardo Romero, en su trabajo de tesis de licenciatura, aplicó la teledetección a la exploración minera esto fue en 1987.



## 2.- Generalidades.

### 2.1 Area de estudio.

El área de estudio se encuentra localizada en la parte Centro-Occidental de Sonora, localizada entre las siguientes coordenadas geográficas: 30 00 y 31 28 de latitud norte; 110 48 y 112 41 de longitud oeste, ver fig. 1.

El área de estudio cubre una superficie aproximada de 34000 Kmts cuadrados.

### 2.2 Vias de acceso.

La principal vía de acceso es la carretera 15 nacional (Internacional), también se tienen las carreteras estatales de Santa Ana-San Luis Rio Colorado, la gran cantidad de caminos vecinales que comunican a las cabeceras municipales, así como las diversas brechas que comunican a ranchos y rancherías y que, en épocas de lluvia son intrasecables Fig. 2.

### 2.3 Clima, Flora y Fauna.

Las condiciones climáticas son hasta cierto grado extremosas. En la zona semidesértica de Caborca, las temperaturas han llegado a subir hasta los 48 grados C. y en ocasiones 50 grados C. en el verano. En invierno las temperaturas son cercanas a los 0 grados y en ocasiones bajo cero. Aquí en esta región, las lluvias son escasas, ocurriendo en el verano en forma de tormentas y en invierno en forma de equinoccios. En lo referente a la flora y la fauna, no es abundante. La flora está compuesta por cactus como: Sahuaros, choya, nopal, biznaga; arbustos y



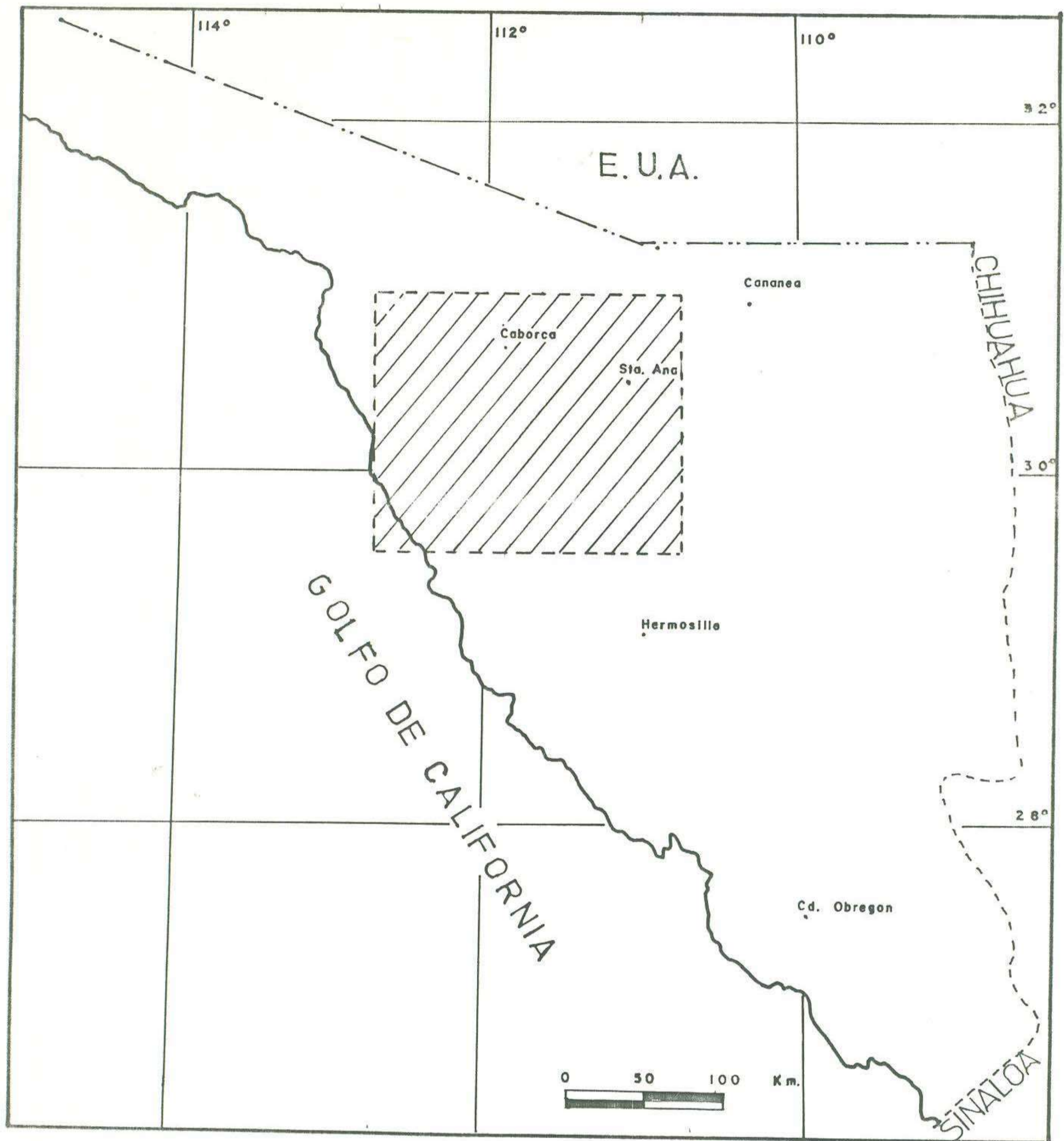


Fig. 1 Localizacion del Area de Estudio



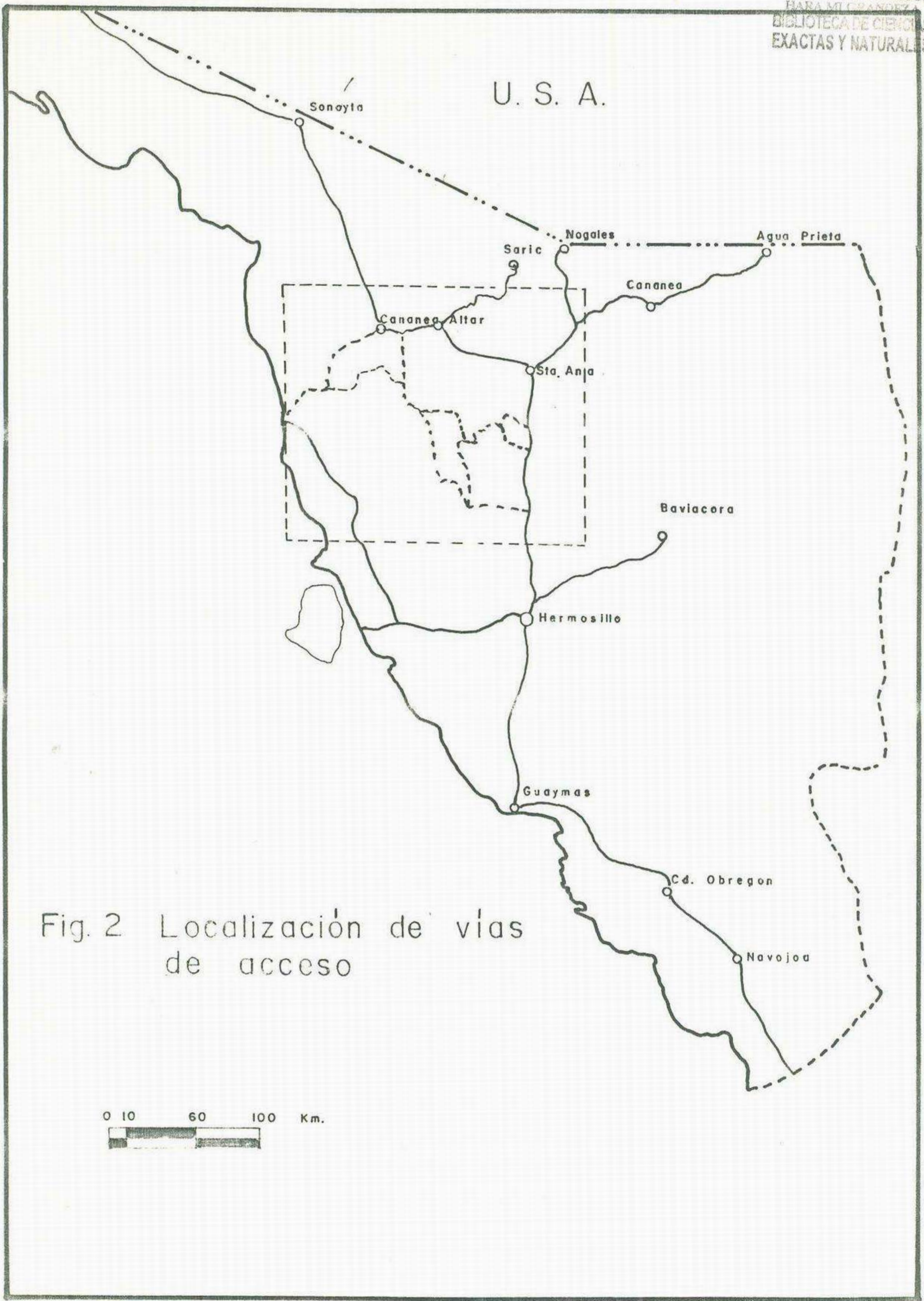


Fig. 2 Localización de vías de acceso



chaparrales como; Uña de gato, sangrengado, palo verde, mezquite, palo fierro; escazo pasto. La fauna esta compuesta por: Borrego cimarrón, venado cola blanca, venado bura, coyotes, aguilillas, halcones, buhos, tortolas, alacranes, tarántulas, viboras de cascabel y coralillo.

### 3.- Fisiografía y Geomorfología.

El área de estudio se encuentra localizada dentro de la provincia de cordilleras sepultadas de Raiz (1959) limitada al occidente por el Mar de Cortéz, al Oriente por la provincia de la Sierra Madre Occidental y al S por el Eje Neovolcánico. Esta, se considera como la prolongación hacia el SE de la "Provincia de Sierras y Valles Paralelos" que tiene su inicio en el terciario inferior (Drewes, 1978). Esta provincia se caracteriza por un lineamiento paralelo N-S de las Sierras y la existencia de grandes valles intermontanos que las separan.

Son muchas las unidades orográficas en el área de estudio y entre otras se pueden mencionar a : Sierra Caracahui, Sierra Santa Rosa, Sierra el Chino-Rajón, Sierra el Alamo, Cerro el Alamo, Sierra de la Jojoba, Cerro el Mayo, Sierra el Jojobal, etc.. Estas unidades tienen una orientación preferencial N-S, NW-SE con  $60 \pm 15$  grados. Teniéndose en la parte Nor-Occidental del área, un grupo de unidades orográficas con un patrón de orientación hasta cierto punto diferente a las demás unidades. Entre estas unidades se pueden mencionar a : Cerro Cabeza Colgada, Sierra Colorada, Cerro el Batamote, Cerros el Amol; este grupo presenta una orientación NW-SE pero con  $25 \pm 15$  grados. Las elevaciones sobre el nivel del mar son variables, habiendo



desde los 200 a 400 Mts. sobre el nivel del mar (Pozos de Serna y áreas cercanas a la Costa) hasta 1500 y 2000 en las Sierras El Alamo, El Viejo, etc. Fig. 3.

Por la topografía general de la región, indica que la zona de estudio se encuentra en la etapa de madurez dentro del ciclo de erosión fluvial.

#### 4.- Hidrografía.

La hidrografía presenta drenajes poco profundos a profundos, pero en general es poco profundo, en algunos lugares este se encuentra controlado por fallas y pliegues, en las zonas bajas el drenaje es dendrítico.

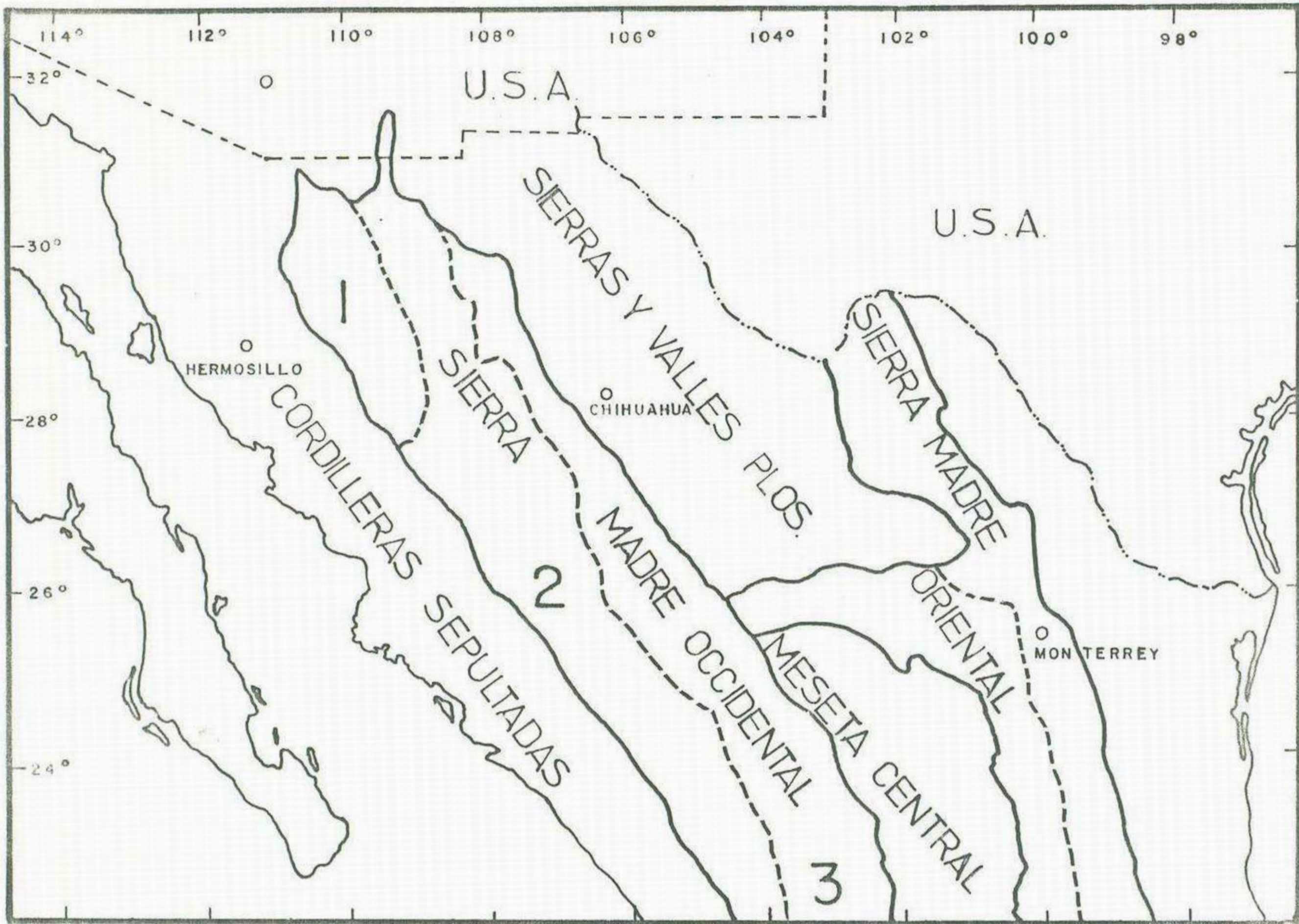
Las principales cuencas hidrográficas son: Río Sonora, Río San Miguel, Río Asunción, Río Magdalena e innumerables arroyos.

#### 5.- Antecedentes bibliográficos.

##### 5.1 Marco Geológico Regional (Pa-Pz).

En el noroeste del Estado afloran las rocas más antiguas de Sonora y de México. Anderson y Silver (1978) dividieron al Estado de Sonora en 2 fajas de rocas cristalinas con características propias en cuanto a su litología y edad. La faja de rocas más jóvenes es la del Noreste y está formada por rocas con edades de 1600 a 1700 m.a.. La otra faja presenta rocas intrusivas con edades de 1700 a 1800 m.a., lo cual deja la posibilidad de la





- 1 Cordilleras Altas Sonorenses
- 2 Meseta de Lava (Riolítica)
- 3 Altiplano Oriental con Cuencas

Fig. 3 SUBPROVINCIAS DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

(Según Raisz, 1964).



existencia de rocas encajonantes más antiguas para la faja noroeste.

En el dominio noroeste, el Precámbrico aflora principalmente en la zona de Caborca. Se divide en 2 grandes series (conjuntos), un complejo inferior del Precámbrico anterior metamórfico y un conjunto superior discordante sedimentario sin metamorfismo y con plegamiento no muy fuerte.

El Pe. anterior tectonizado y metamorfozido durante la fase Mazatzal, aflora en el área del Rancho Bamori; Anderson y Silver (1971) describen aquí una serie metamórfica compuesta de rocas de las facies de anfibolita y esquistos verdes. El Pe. superior sedimentario, descansa en discordancia sobre el Precámbrico anterior, como por ejemplo cerca del Rancho Aibó. Estas secuencias detríticas y carbonatadas con más de 4000 mts. de espesor afloran ampliamente al Sur de Caborca, en las Sierras el Viejo, Cerro Calaveras, Cerros San Agustín, Sierra de la Berruga (Eells 1972).

En el dominio noreste, cerca de la Mina de Cananea, Anderson y Silver (1973) confirman ideas de Emmons (1910) sobre la edad precámbrica (1440 +/- 15 m.a. U/Pb) del granito Cananea, arriba del cual descansa una serie sedimentaria de edad paleozoica. En el noreste del Estado, cerca de la Sierra de los Ajos, afloran esquistos asignados a los esquistos Pinal del Precámbrico de Arizona. En la Sierra de Las Mesteñas, estas rocas están intrusionadas por granitos, y cubiertas en discordancia por cuarcitas del Cámbrico.

En el área Septentrional León y Miller (1981) describieron el yacimiento El Crestón de Opodepe, donde afloran rocas



metamórficas e igneas de posible edad precámbrica. En la región de Tuape Rodríguez (1981) describe el gneis San Isidro y lo compara con las rocas metamórficas de Opodepe de donde León y Miller (1981) describieron rocas precámbricas. Este gneis San Isidro forma parte del basamento ya que la edad de su metamorfismo (U-Pb en zircón es de 1675 m.a. Anderson y Silver (1984)). El basamento granítico y metamórfico de esta región tiene edades que oscilan 1725 m.a. y 1800 m.a. y que posteriormente fueron intrusionadas hace 1725 m.a. y metamorfasadas hace 1650 m.a. (Anderson y Silver 1971). Rodríguez (1981) describe el granito porfidico el Tuti y el granito gráfico Santa Margarita. Estos granitos los considera similares al granito Cananea (1400 m.a.) y al granito Aibó (1100 m.a.) respectivamente.

Los afloramientos de rocas consideradas como paleozoicas, se encuentran distribuidas en forma aislada y a su vez separadas por regiones donde afloran rocas del Mesozoico y Terciario. Los principales afloramientos se pueden localizar al W y S de Caborca, en la región de Cananea-Agua Prieta-Bavispe, al Oriente de Hermosillo; que seria la región de Hermosillo-Matape-Cobachi y un poco más al Oriente se tiene la región de Arivechi-Bacanora-Sahuaripa.

La región noroeste del estado, localizada en las cercanías de Caborca, al S y al W. Ha sido objeto de estudios muy detallados, entre los autores se encuentran: Cooper y Arellano (1946), Longoria (1979, 1980), Maytorena y Durazo (1982), Bruner (1975, 1979), Damon (1983, 1984), Stewart (1984), De Jong (1988)



por citar algunos.

En esta región se tiene aflorando una secuencia que va desde el Cámbrico inferior-medio hasta el Pérmico, sin embargo no existe una sección continua que exponga a toda la secuencia y sólo se pueden localizar como afloramientos aislados. De esa manera se tiene que en el Cerro Rajón está expuesta una secuencia de ortocuarcitas, lutitas y calizas. Entre los fósiles reportados se tienen: Trilobites, arqueociatidos, salterellas, escolitos, girvanelas, representando esta fauna una edad del Cámbrico medio Stewart (1984). El Ordovícico y Devónico medio pertenecen a una secuencia carbonatada con fácies de plataforma, los afloramientos son aislados, encontrándose en: El Rancho Bisani y el Cerro Murcielagos Bruner (1979). El Pensilvánico (Merriam y Eells 1970), se encuentra más al Oeste de Caborca. Una secuencia de grano fino (lutitas y limolitas) que aflora en el Cerro los Monos cerca de Caborca se le asigna una edad de Pérmico (Bruner 1979).

En el noroeste del estado, región de Cananea-Agua Prieta-Bavispe, se encuentra otro agrupamiento de localidades donde afloran rocas de edad paleozoica. Cerca de la Mina de Cananea fué descrita una secuencia carbonatada por Mulchay y Velasco (1951) y correlacionada con secuencias de plataforma que afloran en Arizona. En Agua Prieta, se tienen afloramientos de rocas detríticas y carbonatadas del Cámbrico medio (Ransome 1904, Taliaferro 1933 y Viveros 1965), este paquete cambia a un contenido predominantemente carbonatado hacia la cima y representa edades que van del Devónico medio al Pérmico inferior, Grupo Naco y Formación Escabrosa. Cerca de Bavispe, Inlay (1933)



y Tovar (1968) reconocieron un paquete calcáreo de edad Mississípico medio-Pérmico inferior.

En la región Oriente-Central de Sonora se tienen secuencias que se caracterizan por el ambiente de depósito y por su litología. Se tienen facies exclusivamente calcáreas de plataforma y también dominios detritico-silíceos representando facies de cuenca.

El dominio calcáreo de plataforma está representado por rocas que varían en edad desde el Cámbrico inferior-Ordovísico al Pérmico inferior, sin tener afloramientos de rocas del Ordovísico medio, Silúrico y Devónico inferior. Este dominio calcáreo de plataforma ha sido estudiado: En las Norias por King (1939) Cámbrico-Ordovísico, por Stewart (1984) en la Sierra Agua Verde, en Bacanora-Arivechi por Minjares y Torres (1987) Cámbrico-Ordovísico. El Pérmico se encuentra aflorando a la altura de Hermosillo (Rodríguez 1984 y Martínez 1975), Cerro Cobachi (Noll 1981).

Las facies de cuenca son rocas clásticas de grano fino, medio y grueso; Se encuentran falladas y plegadas, y no han sido estudiadas detalladamente, las edades van desde el Ordovísico medio-superior al Devónico superior, esto en el Cerro Guayacán (Noll 1981). En la Mina Barita de Sonora existe una secuencia de este mismo dominio que va desde el Ordovísico medio al hasta el Pérmico medio, con discordancias entre Ordovísico-Devónico, Mississípico-Pensilvánico, Pensilvánico Pérmico. En la Sierra el Aliso, las rocas de este dominio tienen edades de Ordovísico (Navarro y Soto 1987) y en el Encinal



(Barrera y Dominguez 1987).

En base a la gran cantidad de estudios realizados por diferentes autores y a las columnas estratigráficas presentadas por estos mismos, se puede ver que el espesor del paquete de rocas paleozoicas a nivel regional en el Estado de Sonora decrece de W a E.

#### Marco Geológico Regional (Mz-Cz).

Las rocas de edad jurásica se encuentran bien expuestas en el noroeste de México y en el suroeste de U.S.A.. Sin embargo, de todas las rocas jurásicas las menos comunes son las del Triásico y estas mayormente indican ambiente de depositación marino en un margen continental (Salvador, 1987, p. 240). En la Sierra el Alamo existen afloramientos triásicos reportados por Gonzales (1979, 1980), otros afloramientos triásicos son los reportados por Carrasco (1986) en Pozo de Serna y por Roldan Quintana y Setwart (en preparación) al SE de Hermosillo.

La tectónica de margen activo de Norteamérica fue iniciada durante el Paleozoico Superior y continúa durante el Mesozoico y hasta el Cenozoico Inferior. La deformación compresiva del Oeste de U.S.A. en el Pérmico Superior-Triásico Inferior (Orogenia Sonoma) a sido atribuida a la colisión arco-continente (Dickinson 1981).

Las Rocas de edad Jurásico estan ampliamente distribuidas en el área de estudio y se tienen a las rocas metamórficas del "Grupo Coyotillo" y del Complejo Igneo-Metamórfico de Santa Ana. También se tienen a las rocas sedimentarias y a las vulcanosedimentarias



de la Sierra el Alamo, Sierra el Batamota, Sierra el Chanate, Cerro el Alamo, Cerro Cabeza Colgada, Sierra de la Jojoba, Sierra Chino-Rajón, Sierra de Santa Rosa, Cerro el Mayo y Pozos de Senna,

Las rocas cretácicas están representadas por los afloramientos de rocas volcánicas de Santa Ana e Imuris, la edad se les asignó por relaciones petrológico-estructurales-estratigráficas con áreas adyacentes. Existen plutones graníticos en las cercanías de el Poblado de Félix Gómez al E y W, ocurren también plutones cretácicos que cortan a las secuencias Jurásicas y Pre-Jurásicas.

Existen grandes espesores de rocas volcánicas terciarias en las inmediaciones de Santa Ana, Estación Llano y cerca de la Mina el Tecolote.

Las rocas cuaternarias están representadas por las mesetas de basaltos calco-alcalinos de la Formación comedores, estas afloran en el área de Imuris. Además se tienen los coluviones, aluviones y terrazas aluviales.

A continuación se presenta una recopilación de los afloramientos Jurásicos en sonora.

## 5.2.- El Jurásico en Sonora.

### Triásico-Jurásico inferior y medio.

Sierra el Alamo. Carlos Gonzalez (1980) describe a una secuencia de unos 1350 mts. de espesor y la define como Formación Antimonio, donde su contacto inferior lo observa como una discordancia paralela con la Formación Monos del Pérmico



medio, el mismo autor la divide en dos miembros. El miembro inferior constituido por sedimentos finos con abundante fauna marina; El miembro superior esta formado por sedimentos detríticos gruesos y escasos fósiles. El contacto entre los dos miembros es transicional y la edad para el miembro inferior es Triásico tardío y para el miembro superior es Jurásico inferior a medio Gonzalez (1980). Esta Fm. esta correlacionada con la Fm. Barranca que es del Triásico superior- Jurásico inferior Dumble (1900), Alencaster (Grupo Barranca 1961) que aflora en el centro del Estado de Sonora. En la Sierra el Alamo aflora una secuencia sedimentaria muy similar en litología, edad y contenido fosilífero a la Fm. Antimonio (Fm. Sta. Rosa, Hardy 1973). Esta unidad esta sobreyacida discordantemente por una secuencia volcánica y volcanoclástica andesítica, hacia la cima se observan tobas, aglomerados y brechas.

#### Región Centro-Oriental de Sonora.

Alencaster (1961) define al Grupo Barranca como una secuencia alternada de conglomerados, areniscas y lutitas, con restos de plantas con una edad asignada al Carnico, Alencaster (1961). A este grupo lo divide en las formaciones: Arrayanes, Fm. Sta. Clara, Fm. Coyotes. El Grupo Barranca sobreyace discordantemente a rocas paleozoicas e infrayace discordantemente a la Fm. Tarahumara.

#### Cerros Chino y Rajón.

Aquí aflora un paquete formado por rocas de origen sedimentario clástico y rocas volcanosedimentarias, (Longoria y Pérez); estos autores, reportan en algunos horizontes



carbonatados, fósiles del Jurásico inferior (amonitas). Los mismos autores consideran a esta secuencia integrante de un mismo paquete alóctono sobre rocas precámbricas y también consideran a este paquete cubierto discordantemente por rocas volcánicas y volcanoclásticas de edad Jurásico superior.

#### Sierra Caracahui.

Flores (1929) estudia una secuencia detrítica carbonatada (calizas, lutita y areniscas), conteniendo amonitas del Jurásico inferior. Gordon y Castro (1982) correlacionan a esta secuencia con la parte alta de la Fm. Antimonio, Gonzalez (1980).

H. K. Erben (1954) utiliza el término "facies norte" para denominar a una secuencia del Liásico que aflora en la Sierra de Santa Rosa, Mina Las Animas y Sierra Caracahui; el mismo Erben (1956) desecha el nombre anterior y propone el de Formación Caracahui, Mendoza y Minjares (1989) estudian esa misma secuencia. La localidad tipo de esta Formación es en las cercanías de la Mina "La Julia" en la parte meridional de la Sierra Caracahui y es correlacionable con la Formación Santa Rosa que fué descrita por Hardy (1973).

#### Sierra de López.

Avila (1987) describe un paquete de areniscas, lutitas y lodolitas, con amonitas del Jurásico inferior y la define como Arenisca Gameño, esta secuencia esta sobreyaciendo discordantemente a rocas paleozoicas y cubierta discordantemente por rocas volcánicas y volcanoclásticas, la base de esta secuencia se desconoce.



Sierra Santa Rosa.

Hardy (1981) reporta un paquete de areniscas, calizas arcillosas y lutitas que presentan fósiles del Jurásico inferior. Este autor propone un contacto por cabalgadura entre esta secuencia y las rocas metamórficas y sedimentarias precámbricas y a su vez esta misma secuencia se encuentra concordantemente cubierta por rocas volcánicas y volcanoclásticas del Jurásico medio, Hardy (1980).

Basados en la presencia en la parte basal de esta secuencia, de un conglomerado que contiene fragmentos de rocas Precámbricas y del Jurásico inferior Minjares y Torres (1987) consideran que posiblemente estas rocas sean más jóvenes y proponen una edad del Jurásico superior-Cretácico inferior.

Jurásico Superior.

Pozos de Serna.

Beauvais y Stumps (1976) describieron una secuencia que aflora en las cercanías del Rancho Pozos de Serna. El paquete esta compuesto por lutitas negras, areniscas, brechas, conglomerados. En cuanto al contenido fosilífero se tienen amonitas del Jurásico superior.

Arivechi.

Martinez y Palafox (1985) describen una secuencia de lodolitas, areniscas y en menor cantidad calizas y con un espesor considerable de brecha sedimentaria, por la presencia de belemnites, estos autores le asignan una edad del Aptiano. Pubelier (1987) en base a argumentos estratigráficos y



paleontológicos propone una edad del Jurásico superior para la misma secuencia. Martínez y Palafox (1985) nombraron a esta unidad Formación Las Cumaras.

#### Cucurpe.

Rangin (1977) describe una serie volcanoclástica formada por andesitas, riolitas y grauvacas que sobreyacen a unas lutitas negras. Hacia la cima el contenido volcánico disminuye y culmina con lutitas negras con amonitas del Jurásico superior.

#### Tuape.

Rodríguez (1984-1986) reporta una secuencia que consiste en rocas volcanoclásticas y clásticas, la base de esta secuencia no se conoce. Este mismo autor divide en 5 unidades a toda la secuencia: Unidades A y b rocas volcanoclásticas; Unidades B, C y D lutitas, limolitas, areniscas, calizas, conglomerados. El contenido fosilífero de las calizas consiste en amonitas del Jurásico superior (Rodríguez, 1986). Este autor propone un contacto concordante con las unidades cretácicas y el contacto con las unidades volcanoclásticas Jurásicas es tectónico.



Rocas volcánicas Jurásico medio-sup., Cretácico inferior.  
Cananea.

Valentine (1936; en Navarro y Ochoa) describe y nombra a un paquete de rocas volcánicas: Dacitas, aglomerados, tobas, riolitas, volcanoclasticas, traquitas y grauvacas intercaladas. Como las Formaciones Elenita y Henrrieta, cubren discordantemente a las rocas del Paleozoico y se encuentran cubiertas por la secuencia sedimentaria del Grupo Bisbee del Jurásico superior-Cretácico inferior.

Agua Prieta.

Solano (1987; en Torres y Minjares) reporta un paquete de rocas volcánicas del J inf., este paquete aflora en la Sierra La Ceniza en las cercanías de Agua Prieta. Se pudiera inferir una posible correlación con las rocas volcánicas de Canelo Hills, en Arizona. Según parece, este paquete de rocas volcánicas cubren discordantemente a las rocas paleozoicas y a su vez están cubiertas por las rocas sedimentarias del Grupo Bisbee.

Río Yaqui.

Garduño y Castro (1982; en Torres y Minjares) reportan el afloramiento de un paquete de rocas volcánicas conformadas por: Tobas, brechas andesíticas y andesitas almohadilladas, contienen intercalaciones de calizas micriticas variando secuencialmente a calizas limosas con pelecípodos y foraminíferos. El afloramiento se encuentra en el camino Sahuaripa-Divisaderos, al cruzar el Río Yaqui.



#### Rio Sonora.

Roldan y Solano (1978) describen en la cuenca del Rio Sonora al NW de Arizpe y cerca de San Felipe, una secuencia de :  
Tobas, lavas andesiticas, intercaladas con conglomerados y calizas con orbitolinas.

#### Sierra El Alamo.

Gonzalez (1980) describe un paquete de rocas piroclásticas, volcanosedimentarias andesiticas, conglomerados y brechas. Por datos de edades radiométricas Gonzalez (1980), asigna a este paquete una edad de Cretácico inferior. Pero Garduño y otros (1982) consideran a este paquete correlacionable con rocas volcánicas del Jurásico medio-sup. que afloran a lo largo de la Costa.

#### Sierra De Moradillas.

Abadie (1981) describe una secuencia volcano-sedimentaria compuesta por arenisca tobáceas, limolitas, andesitas, tobas y calizas intercaladas, con rasgos de metamorfismo de contacto. Esta secuencia esta cubriendo discordantemente al Grupo Barranca (Alencaster 1961) y a su vez cubierta en discordancia en forma angular por rocas volcánicas. Sin datos paleontológicos se le asigna una edad Cretácica.

#### San Marcial.

Dumble (1900) en (King 1939). Define y nombra como División Lista Blanca a un paquete de tobas, aglomerados andesíticos y conglomerados de un espesor aprox. de 150 a 170 mts.. King (1939)



propone que esta secuencia de derrames volcánicos se encuentra sobreyaciendo a cuarcitas del Grupo Barranca (King 1939), por el hecho de no haberse encontrado fósiles, la edad se considera tentativa. Dumble (1900) asigna una edad triásica; en estudios posteriores y por comparación con rocas del área de Sahuaripa King (1939) le asigna una edad Cretácico inferior a esta misma unidad.

#### Tuape.

Rodriguez (1984) reporta y describe una secuencia de tobas, brechas andesíticas interestratificadas con areniscas y tobas. Su contacto inferior es discordante sobre rocas precámbricas y tanto las rocas volcánicas Jurásicas como el basamento Precámbrico, cabalgan a rocas del Jurásico superior y Cretácico inferior sedimentario. En base a datos puramente estratigráficos el citado autor le asigna una edad Jurásica.

#### Sierra de Santa Rosa.

Hardy (1981) describe una secuencia de derrames volcánicos andesíticos y piroclásticos. La denomina Formación San Luis, la base de esta secuencia está marcada con la aparición de un conglomerado con fragmentos de dolomías y cuarzoarenitas. El mismo autor opina, que la Formación San Luis sobreyace por contacto transicional a la Formación Santa Rosa del Jurásico inferior, por esta razón, el autor propone que por su posición estratigráfica, la Formación San Luis es de edad Jurásico medio-superior. Rangin (1982), Minjares y Torres (1987) suponen que por la existencia del conglomerado basal de esta unidad y además por correlaciones con secuencias similares, esta unidad podría ser



más joven, Jurásico superior-Cretácico inferior. Hardy (1981) propone, que ésta unidad es parte de un paquete alóctono, junto con su basamento del Jurásico inferior, que cabalga a rocas metamórficas y sedimentarias del Precámbrico.

#### Sierra San Javier.

En ésta área aflora un paquete de rocas volcánicas de composición intermedia como: tobas, andesitas, aglomerados y con intercalaciones de sedimentos. La presencia de una brecha con fragmentos de arenisca en la parte basal de ésta unidad, hace suponer a (Dumble 1899, en Abadie 1981) que sobreyace discordantemente sobre el Grupo Barranca. Esta misma brecha, King (1939) la considera como parte basal de esta unidad.

#### Sierra Bacha y Seri.

Anderson (1977) reporta la existencia de basaltos andesitas y riolitas en la Sierra Bacha y Seri, por fechamientos este autor asigna una edad de 140-125 m.a., Cretácico inferior. Gastil y Krumenacher (1977) reportan el afloramiento de rocas granitoides que tienen edades de enfriamiento de 100-80 m.a., Cretácico inferior. El afloramiento se encuentra en áreas cercanas a la costa de Sonora. Gastil y Krumenacher (1977) reportan en Santa Margarita y Puerto Lobos la existencia de andesitas, riolitas y basaltos, que por fechamientos isotópicos (U/Pb) se asigna una edad del Jurásico superior-Cretácico inferior, 142 +/- 2 m.a..



Arivechi.

Torres y Minjares (1987) reportan un paquete de rocas volcánicas y volcanosedimentarias, a las cuales, por fechamientos radiométricos le asignan una edad de Jurásico superior (Damon 1985; en Torres y Minjares 1987). Los mismos autores proponen cabalgando a ésta secuencia volcánica sobre rocas del Jurásico superior y sobre un paquete sedimentario autóctono del Cretácico inferior. Esta misma serie volcánica es cabalgada por su basamento Paleozoico.

Cerros Chino y Rajón.

Longoria y Pérez (1979) describen una secuencia de derrames y tobas riolíticas, con intercalaciones de rocas detríticas y volcanosedimentarias, presentan también, horizontes calcáreos fosilíferos. Esta secuencia, descansa en forma transicional sobre un paquete de sedimentos detrítico-calcáreos y que presentan amonitas del Jurásico inferior. La edad de esta secuencia se supone Jurásica por lo anterior, además, por correlacionarse con las rocas sedimentarias de la Sierra el Alamo y la Sierra Santa Rosa.

Sierra Gloria y Cerro Basura.

Corona (1979) describe un paquete de rocas volcánicas y volcanosedimentarias con intercalaciones de rocas detríticas y calcáreas. En éstas rocas se puede observar foliación y presentan un metamorfismo en la facies de esquistos verdes. Esta secuencia es cubierta en discordancia angular, por rocas volcánicas. El autor correlaciona a esta secuencia con formaciones similares en Arizona y propone en base a esto una edad de Jurásico medio para



esta secuencia.

#### Sierra El Chanate.

Jaques-Ayala (1983) describe una secuencia de areniscas, lutitas con estratos intercalados de conglomerados, los clastos que predominan en la secuencia son de rocas volcánicas. El autor nombra a esta unidad como Formación Batamote y propone que esta unidad pertenece a una fase de turbiditas, el mismo autor propone un contacto por fallamiento inverso entre el Jurásico y las rocas cretácicas, esta falla encima al Jurásico sobre el cretácico.

#### Rancho el Alamo.

Willard (1988) describe y nombra a la Formación la Máquina, la cual está compuesta de areniscas, lutitas, conglomerados. El conglomerado se encuentra deformado y también se presenta un pequeño espesor de calizas sin fósiles. El lugar de afloramiento se encuentra al norte de Pitiquito. El contacto inferior de esta unidad es incierto, en algunos lugares aparece como una falla de cabalgadura, la cual, emplaza a la Formación la Máquina estructuralmente sobre la Formación Puerto el Alamo. El contacto superior, está cubierta por el aluvión y no está expuesto en toda el área. La edad definitiva de esta unidad no ha sido bien determinada pero el autor le asigna una posible edad Jurásica y le asigna esta edad por estar emplazada por cabalgadura sobre unidades más jóvenes y además por correlacionarla con las rocas volcanoclásticas descritas por Corona (1980) en el Cerro Basura y Sierra La Gloria.



Cerro el Alamo.

Willard (1988) define a la Formación Puerto El Alamo, en el puerto que se encuentra entre la Sierra El Batamote y el Cerro El Alamo, por ser aquí donde mejor está expuesta la unidad. Esta formación esta compuesta por: Conglomerados, areniscas y lutitas interestratificadas y algunos pequeños espesores de lodolitas. El contacto inferior de esta unidad es por falla de cabalgadura, la cual emplaza a la Formación Puerto El Alamo, sobre las Formaciones Cretácicas El Chanate y Arroyo Sásabe Jaques-Ayala (1983) y Jaques-Ayala y Potter (1987) respectivamente. El contacto superior de esta unidad es por falla de cabalgadura, la cual emplaza estructuralmente a la Formación La Máquina sobre esta unidad. La edad definitiva de esta unidad aún no ha sido propuesta, pero es muy posible que sea Jurásico tardío-Cretácico temprano Willard (1988), un reporte paleontológico de esta unidad (Roldan 1988, en Willard 1988) hacen suponer esto. La Formación Puerto El Alamo, es probablemente correlacionable con el Conglomerado Jurásico (?) descrito por Corona (1980) en la Sierra La Gloria. Jaques-Ayala (1983) sugiere que la Formación El Batamote se extiende desde la Sierra El Chanate hasta el Puerto El Alamo y dentro del área de la Sierra La Gloria.

Sierra de la Jojoba.

Morales (1982) describe y define como Grupo Fátima a un potente paquete vulcanosedimentario, con un espesor superior a los 2000 mts. y que en su parte superior contiene fósiles del Jurásico Inferior.

A este paquete, el mismo autor lo divide en tres miembros:



Miembro Inferior. Esta constituido por lutitas negras, areniscas ferruginosas, calizas con estratificación media, masivas, color gris claro, la base de este miembro se desconoce por estar cubierta por aluvi6n y rocas volcánicas. No presenta fósiles, pero por sus características petrol6gicas y texturales, hace pensar que se trata de una fasies de la Formaci6n Barranca y que es equivalente a la parte inferior de la Formaci6n Antimonio (Gonzalez, 1979).

El miembro medio es concordante al Miembro Inferior, se encuentra formado por: Conglomerados, areniscas volcanoclásticas, wackas y derrames andesíticos. Este Miembro es facilmente reconocible a distancia, porque se encuentra en las partes altas de la Sierra y presenta coloraciones café obscuro.

El Miembro Superior. Representa una secuencia marina, la cual esta constituida por: Lutitas negras, limolitas calcáreas fosilíferas y calizas gris claro con laminaciones.

Aunque en el Miembro Inferior y Medio no se encontraron fósiles, en el Miembro Superior si, presenta un horizonte fosilífero conteniendo fauna representativa del Jurásico Inferior (Liásico), determinada por G. Alencaster.

El Miembro Superior es correlacionable con la Formaci6n Santa Rosa y la Formaci6n Cerro San Luis (Hardy, 1973); y su parte inferior puede ser equivalente a la Formaci6n Barranca. La cima y la base de esta unidad se desconocen.

Rangin (1982) asigna al Miembro Inferior y Medio del "Grupo Fátima" una edad probable del Cretácico (?) descansando en discordancia sobre el Liásico



Rocas Metamórficas Jurásicas. Salas (1968) define y divide en dos secuencias a un conjunto de rocas metamórficas que afloran en las cercanías de Santa Ana e Imuris. A estas dos secuencias las nombra como "Grupo Coyotillo" y "Complejo igneo-metamórfico de Santa Ana" respectivamente, y les asigna una edad precámbrica a las dos secuencias.

El Complejo Igneo-Metamórfico de Santa Ana consiste de micaesquistos, cuarcitas, mármoles, gneises cuarzo-feldespáticos, esquistos granatíferos y esquistos cálcicos derivados de rocas pelíticas, detriticas y carbonatadas, metamorfasadas en la facies de los esquistos verdes-anfibolita, esta secuencia está asociada a intrusivos graníticos metamorfasados y pegmatíticos que la cortan.

Los afloramientos del Complejo Santa Ana conforman lo que viene siendo las partes altas de las Sierras: El Potrero, Jarillas, El Alamo Viejo, Los Chinos, Magdalena. Se ha reportado la presencia de este Complejo en las áreas aledañas a Saric, Tubutama y Altar.

Morales (1982), en base a relaciones estratigráficas, a rasgos morfológicos, a relaciones litológicas, a estilos tectónicos, a la presencia de lo que pueden ser restos orgánicos y por ultimo en base a fechamientos radiométricos, postula una edad de Jurásico Medio-Superior para este Complejo Metamórfico. La fase de deformación que originó a estas rocas, ocurrió en el Oxfordiano y Albiano, correlacionandose esta con la Fase Nevadiana.



El "Grupo Coyotillo" consiste en una secuencia de rocas metamorfoseadas consistentes en: Filitas, cuarcitas, micaesquistos, mármoles y metaconglomerados, pertenecientes a la facies de los esquistos verdes.

Esta unidad aflora en las cercanías de la población de Santa Ana y en la Sierra el Potrero. Por esta razón, Morales (1982) considera a el "Grupo Coyotillo" como una extensión del Complejo Igneo-Metamórfico de Santa Ana y más bien se deben considerar como una sola secuencia metamórfica. La individualidad de los afloramientos es consecuencia de fallamiento y de la erosión diferencial. Con los mismos conceptos, en los que se basa para proponer una edad de Jurásico Medio-Superior para el Complejo Igneo-Metamórfico de Santa Ana, Morales (1982) también los utiliza para asignar una edad del Jurásico Medio-Superior al "Grupo Coyotillo".



## 6.- METODOLOGIA. (Material y métodos de trabajo).

Introducción. Las imágenes producidas por sensores desde satélites tienen hoy día amplias aplicaciones en geología. Esta nueva técnica de apoyo ha permitido el mejoramiento del mapeo geológico y el hallazgo de nuevas áreas positivas en la exploración de los recursos naturales como: agua, yacimientos minerales tanto metálicos como no metálicos, hidrocarburos, cartografía geológica regional.

Las ventajas más sobresalientes de las imágenes obtenidas desde satélites son: visión sinóptica de grandes áreas, la mejor resolución espectral y la obtención de la información de manera digital.

La integración de la información geológica digital con otras clases de información digital, permite un manejo más adecuado y efectivo para diversos propósitos de investigación.

Este trabajo está enfocado a plantear una metodología, para la interpretación de imágenes de sensores remotos y aplicar esa metodología en la interpretación de una imagen Landsat (MT) y obtener como resultado un mapa estructural, además, plantear una hipótesis sobre la información obtenida a partir de la imagen.

### M E T O D O L O G I A

Metodología. Los mapas producidos a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos, pueden disminuir el problema sobre el escaso conocimiento de muchas áreas a causa de sus difíciles accesos o de información mínima de campo.



La precisión de los mapas obtenidos a partir de la teledetección, está en función de la cantidad de controles de campo posibles, los tipos de imágenes examinadas y la habilidad del intérprete.

La interpretación de imágenes de sensores remotos es óptima cuando está acompañada de interpretación de fotografías aéreas (convencionales). El entendimiento de las propiedades espectrales de las rocas y de otros materiales será básico.

Para desarrollar el trabajo se utilizó 1 imagen de la generación Landsat 4, captada por el sensor "Mapeador Temático". Las imágenes tienen una composición en blanco y negro de las bandas 4, 5 y 7. Siendo las bandas 4 y 5 del rango de luz visible y la banda 7 del infrarrojo medio, la escala de la imagen es 1:250000. La imagen fue obtenida el 8 de Enero de 1983, el centro de la imagen se encuentra aproximadamente en el poblado de La Cienega, perteneciente al Distrito de Altar (ver mapa de localización) Fig. 1.

Se hizo la fotointerpretación parcial del área, utilizando fotografías aéreas verticales de escala 1: 50 000, las cuales son editadas por el INEGI. También se consultaron mapas geológicos escala 1: 250 000 editados por la misma institución. Se realizó verificación de campo para definir las estructuras, se tuvieron aproximadamente 30 días de trabajo de campo, se contó con un vehículo proporcionado por el Departamento de Geología. Posteriormente se vació la información en un mapa.



La imagen fué interpretada visualmente, para lo cuál se siguió la secuencia que aquí se presenta:

#### Secuencia Metodológica.

- 1.- Colocar datos geográficos.
- 2.- Trasar la red de drenaje
- 3.- Ubicar los principales poblados.
- 4.- Hacer el mapeo litológico.

Para el mapeo litológico es importante el análisis de patrones de drenaje, de vegetación, de geformas, de las influencias climáticas y el más importante, el caracter espectral de las rocas representado por tonos y colores.

Es evidente que el mapeo litológico a partir de imágenes tiene muchas limitaciones y se debe enfocar el mapeo preliminar de áreas regionales donde no se tiene casi información. Las condiciones más favorables para el mapeo litológico se hallan en ambientes áridos y semiáridos.

4.1.- Analisis de Geformas. Semejante, como en la fotografía aérea convencional, los terrenos de rocas sedimentarias son mejor reconocibles en las imágenes, dan mayor información que los terrenos ígneos y metamórficos. Las diferencias con respecto a la erosión resultan de una resistencia diferencial. La apariencia bandeada de diferentes tipos de roca y que será modificada según los espesores, caracter litológico, inclinación de las unidades de roca y la cubierta de vegetación.

Las rocas ígneas intrusivas rara vez tienen formas típicas, pueden ser reconocidas algunas veces por su relación con



las rocas circundantes. Los diques son relativamente fáciles de identificar por su expresión topográfica lineal o curvilínea. Estos pueden formar crestones o depresiones. Los grandes cuerpos intrusivos (stocks, batolitos) tienen con frecuencia formas circulares que se pueden expresar en la topografía. Donde las rocas intrusivas cubren grandes áreas, las formas típicas están ausentes y presentan formas masivas, esta naturaleza homogénea puede servir de diagnóstico. Casi todos los grandes cuerpos intrusivos exhiben un patrón entrecruzado de fracturas, expresado especialmente por la tonalidad o disposición de la vegetación.

La identificación de las rocas metamórficas es difícil, generalmente se obtiene la mejor información en terrenos donde el metamorfismo y deformación no han sido intensos y las estructuras primarias de las rocas aún se conservan. Donde las rocas metamórficas han sido derivadas de rocas sedimentarias, puede observarse bandeamiento o estratificación y es posible la identificación de contraste de litologías. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la foliación y esquistosidad pueden dar lugar a similar apariencia.

4.2.- Análisis de drenaje. El análisis de drenaje constituye una herramienta útil en la técnica interpretativa. La densidad de drenaje, frecuencia de corriente y patrón de drenaje, deben de ser interpretados en el contexto de ambiente climático, relieve relativo y condiciones terrestres. Por ejemplo, una misma litología puede mostrar un drenaje más grueso en una región húmeda que en una región árida o semiárida.



La permeabilidad constituye quizás el factor más importante en el control y apariencia textural del drenaje. La permeabilidad estará controlada por varios factores tales como la naturaleza y desarrollo del suelo, cubierta vegetal y presencia de fracturas en las rocas. El patrón de drenaje refleja primariamente la influencia de estructuras y secundariamente la litología.

4.3.- Análisis de vegetación. Aunque la vegetación frecuentemente obscurece la superficie de la roca, puede sin embargo suministrar información útil para delimitar litologías y el reconocimiento de estructuras. Bajo condiciones climáticas uniformes, diversas clases de vegetación están en relación directa con los tipos de roca o suelo.

4.4.- Reflectividad espectral. La reflectividad espectral de los materiales terrestres es frecuentemente el criterio más valioso para diagnosticar litologías, la reflectancia espectral o cantidad de luz reflejada es expresada en las imágenes por tono o color.

En las rocas ígneas la respuesta espectral ocurre principalmente como resultado de la presencia de óxidos de hierro y agua. Esto mismo es aplicable para rocas sedimentarias y metamórficas. Como excepción tenemos a los carbonatos que observan fuertes absorciones causadas por enlaces CO y Al-O-H en materiales arcillosos.

4.5.- Efectos climáticos. Diferencias significativas en geoformas resultan de condiciones climáticas diferentes. Dadas



ciertas condiciones climáticas, algún proceso geomorfológico será dominante e impondrá las características del paisaje. En las regiones con abundante agua y con moderada o alta temperatura, el proceso dominante será la meteorización química junto con el transporte de material. En las regiones tropicales húmedas, se produce una cubierta de suelo gruesa obscureciendo totalmente las rocas infrayacentes. La topografía resultante está caracterizada por pendientes suaves. Estas áreas en consecuencia ocultan las características litológicas, haciendo entonces difícil la interpretación.

En regiones intermedias, la meteorización química no es dominante, las geoformas tienden a ser más abundantes y los rasgos topográficos más abruptos, reflejándose entonces mayormente la meteorización mecánica y los suelos menos desarrollados. La asociación suelo-roca es más estrecha, la cubierta de vegetación es más reducida y por consiguiente los afloramientos de roca están mejor expuestos. Como conclusión, la obtención de información litológica es mayor en regiones intermedias que en regiones tropicales.

En regiones áridas y semiáridas donde la precipitación pluvial es casi nula, el proceso geomorfológico dominante es la meteorización física. El movimiento de masas es mínimo y las unidades de rocas son mejor reflejadas en la topografía. Estas áreas poseen gran cantidad de información litológica a partir de imágenes de sensores remotos desde satélites.

Las diferencias de paisaje como resultados de condiciones climáticas puede ser bien ilustrada en la morfología



de las calizas. En regiones húmedas es susceptible de desarrollar cavidades de disolución, mientras que en regiones áridas es una roca resistente y forma comúnmente escarpes y colinas.

4.6.- Análisis de espectros en el laboratorio. Son una base preliminar para determinar los rangos de longitud de onda que determinan la separabilidad de varios materiales. Estos datos no tienen en cuenta factores tales como: la absorción atmosférica, cubierta de suelo o vegetación. A pesar de esto la información de laboratorio es necesario para el entendimiento e interpretación de las imágenes.

En la figura 4 se observa un espectro de laboratorio representativo de rocas ígneas. El espectro está arreglado en orden de composición desde de muy ácidas en la parte superior hasta rocas básicas en la parte inferior. El granito gráfico muestra absorción en 1.4, 1.9 y 2.2 Mm. Mientras la biotita y el granito muestran disminución en la absorción debido a su mayor contenido de agua.

Las rocas intermedias y básicas contienen menos agua y mayor contenido de mineral opaco (magnetita). La magnetita produce la reducción de la reflectancia y también reduce el tamaño de cualquier absorción espectral. La presencia incrementada de hierro (férico/ferroso) produce absorciones espectrales cerca de 0.7 y 1.0 Mm, respectivamente.

En la figura 5 se muestra un espectro de laboratorio representativo para rocas sedimentarias. En general, el fenómeno dominante es la absorción entre 1.9 y 2.3 Mm debido a la



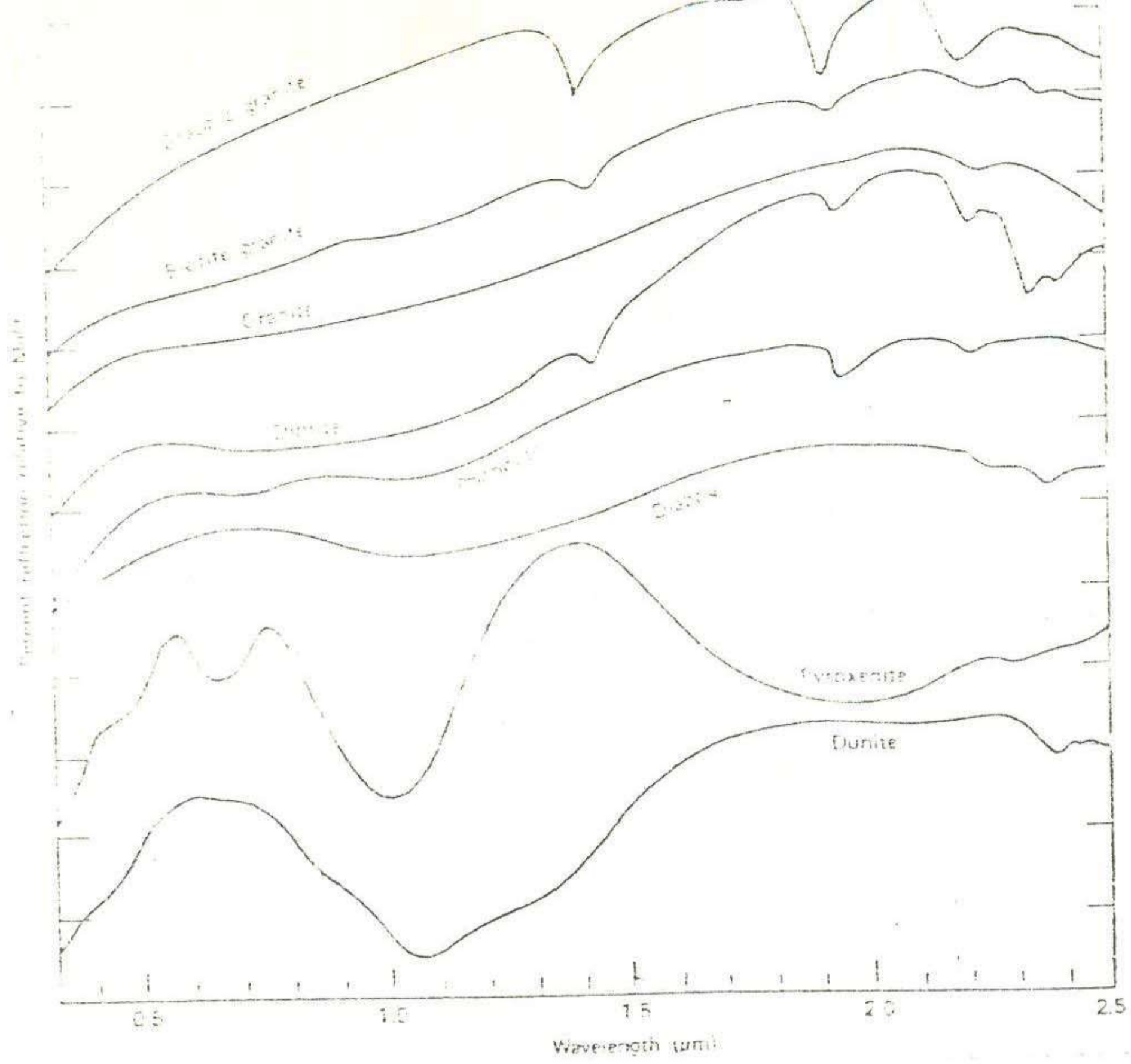


Figura 4. Espectro de laboratorio en rocas ígneas

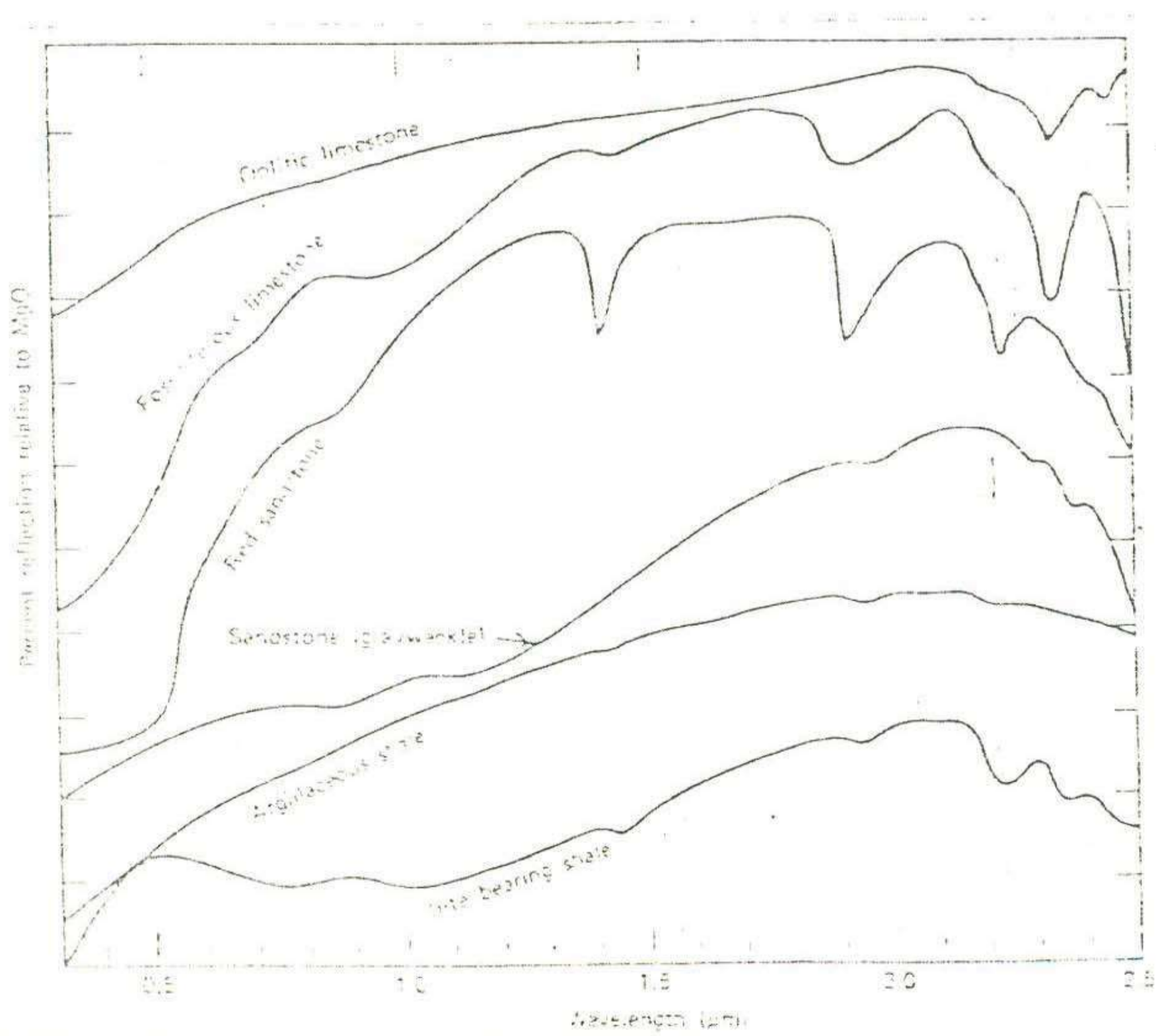


Figura 5. Espectro de laboratorio en rocas sedimentarias



presencia del radical carbonato. La banda más intensa se localiza en 2.3 Mm y es exhibida por la caliza fosilífera. La mayoría de las calizas exhiben bandas de agua en 1.4 y 1.9 Mm.

Las areniscas muestran absorción en 1.4, 1.9, 2.2 y 2.3 Mm debido a la presencia de matriz hidratada o con algún contenido de cemento calcáreo. Los terrígenos de grano fino como las arcillas y las lutitas que contienen suficiente material carbonaceo enmascaran los fenómenos espectrales.

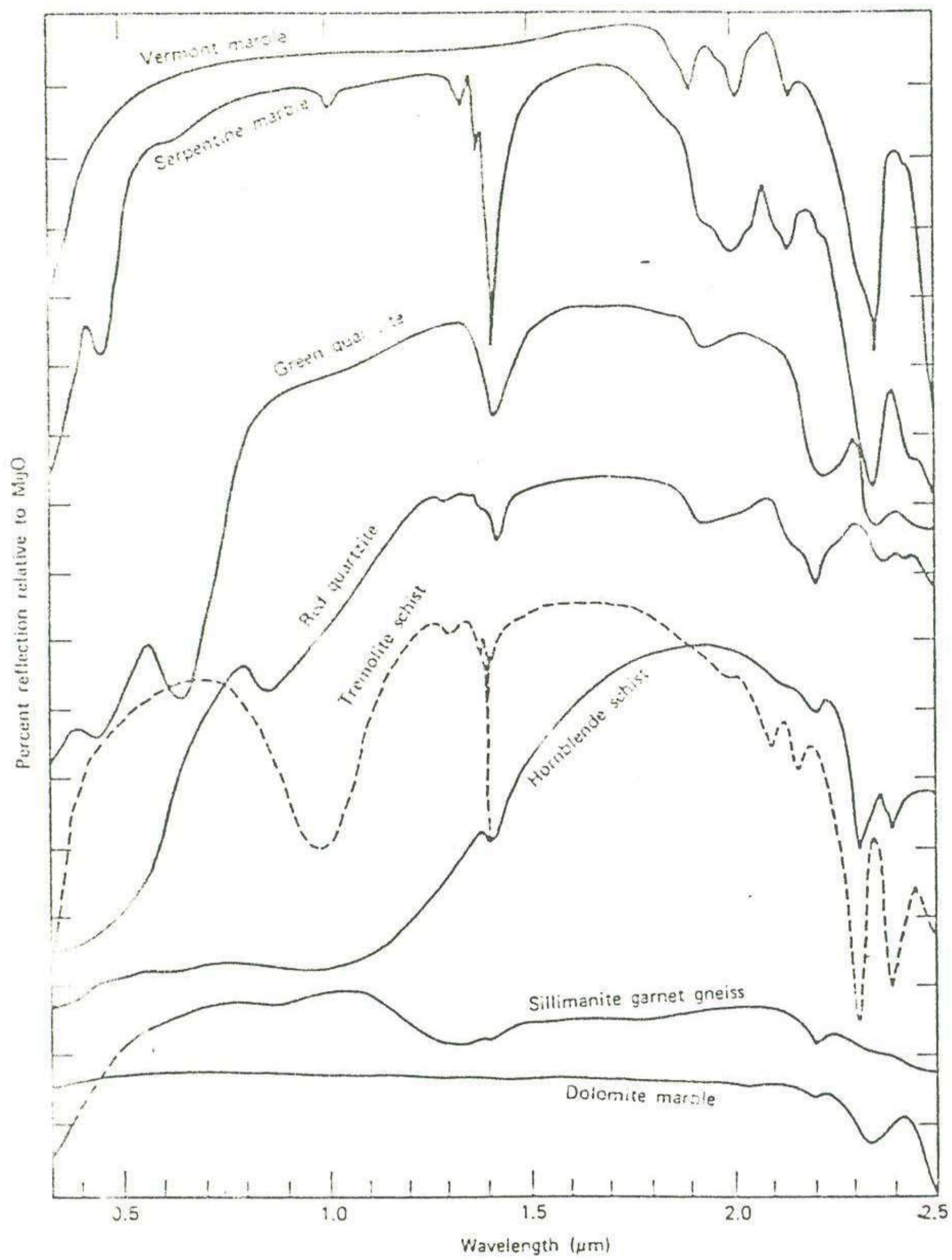
En la figura 6 se presenta un espectro de laboratorio representativo de rocas metamórficas.

4.7.- Espectros en el campo. Cuando se procede con materiales in situ, factores ambientales modifican y complican el espectro. La presencia de vegetación, agua, compuestos orgánicos y obras artificiales dificultan la clasificación. Un método práctico empleado es usar datos de reflectancia espectral in situ para interpretar la información multispectral obtenida en el campo, es más representativo y podemos incluir factores físicos, ambientales que modifican la respuesta espectral.

4.8.- Expresión de reflectividad espectral en las imágenes. La reflectividad espectral esta expresada en las imágenes por tono o color. El tono fotográfico es una medida de la cantidad relativa de luz reflejada por un objeto en una región dada de longitud de onda y se presenta como variaciones de gris.

El tono fotográfico está modificado por la geometría del material, contenido de agua, cubierta de vegetación, efectos atmosféricos, respuesta de sensores y procesamiento fotográfico.





**FIGURA 6** Espectro de reflectancia Bidireccional. Divisiones cada 10%. Tomado de Siegal-Gillespie, 1980.



La geometría es importante para determinar la cantidad de radiación incidente y radiación reflejada. La humedad reduce la reflectancia en las regiones espectrales visible e infrarroja. El color es probablemente el elemento de reconocimiento más valioso en interpretación de imágenes porque el ojo humano es capaz de diferenciar casi 1000 tonalidades de color. La información espectral en el infrarrojo cercano es usualmente registrada en films infrarrojos a color. En imágenes infrarrojas a color, la vegetación es roja debido a la alta reflexión de la clorofila en el infrarrojo, las rocas rojas son amarillas, los materiales grises no tienden a registrar cambio. En las figuras 7 y 8 se observan varios ejemplos de efectos de la cubierta de vegetación sobre varios materiales de roca.

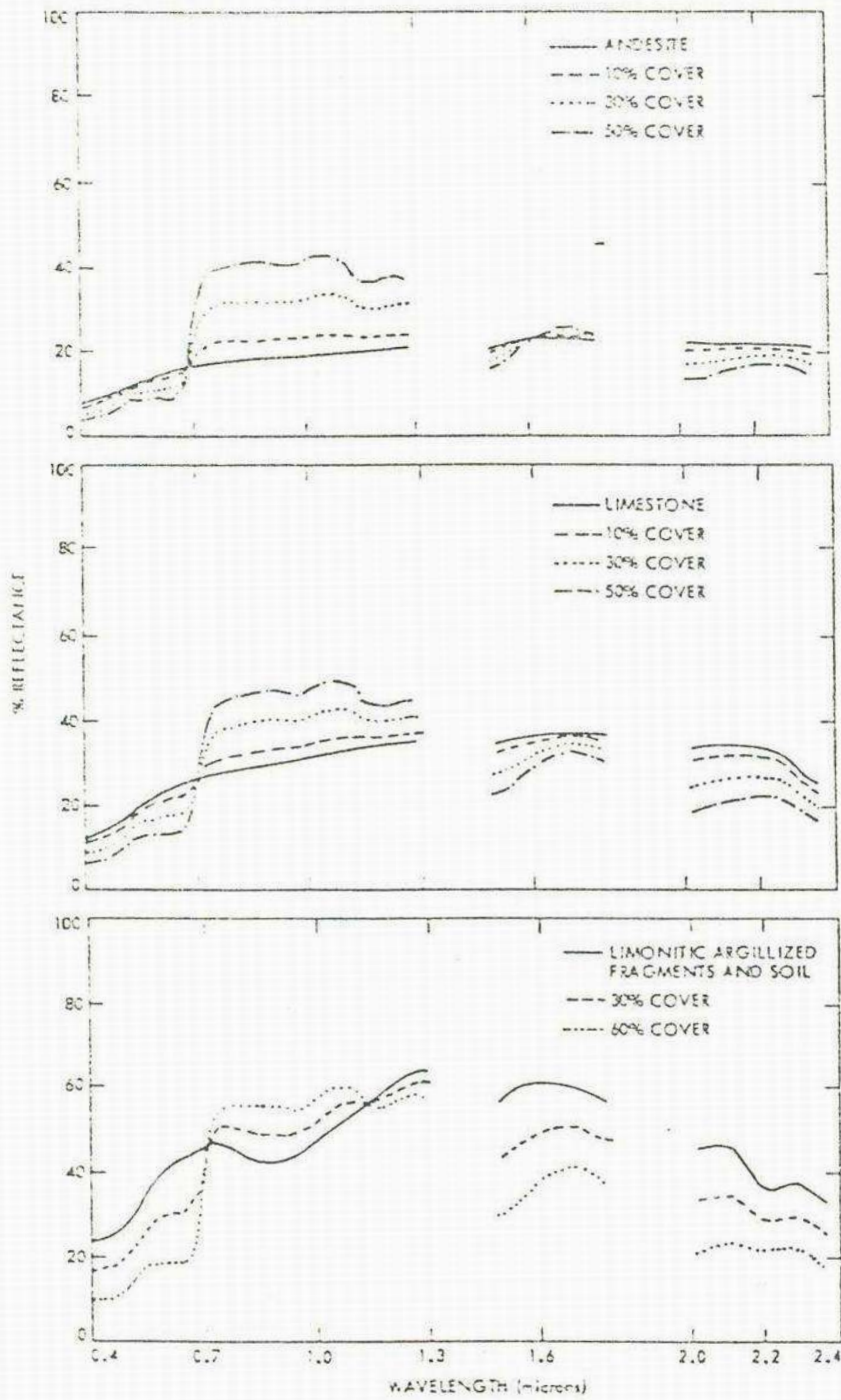
La información espectral en la región inferior a 1  $\mu$ m, es registrada en cinta magnética para ser procesada o revelada directamente en films blanco y negro. Esta información está registrada en diferentes bandas y a partir de las mismas, puede obtenerse composiciones a color (falso color) muy útiles en interpretación geológica.

4.9.- Selección de bandas espectrales. La separabilidad de materiales en las imágenes depende de el tono fotográfico relativo. Para obtener mejor contraste entre materiales es necesario el estrechamiento de las regiones de longitud de onda. De esta manera, logra obtenerse óptima separación de materiales.

En la tabla 1 se presenta una clasificación de las mejores longitudes de onda, para la separación de diferentes materiales.



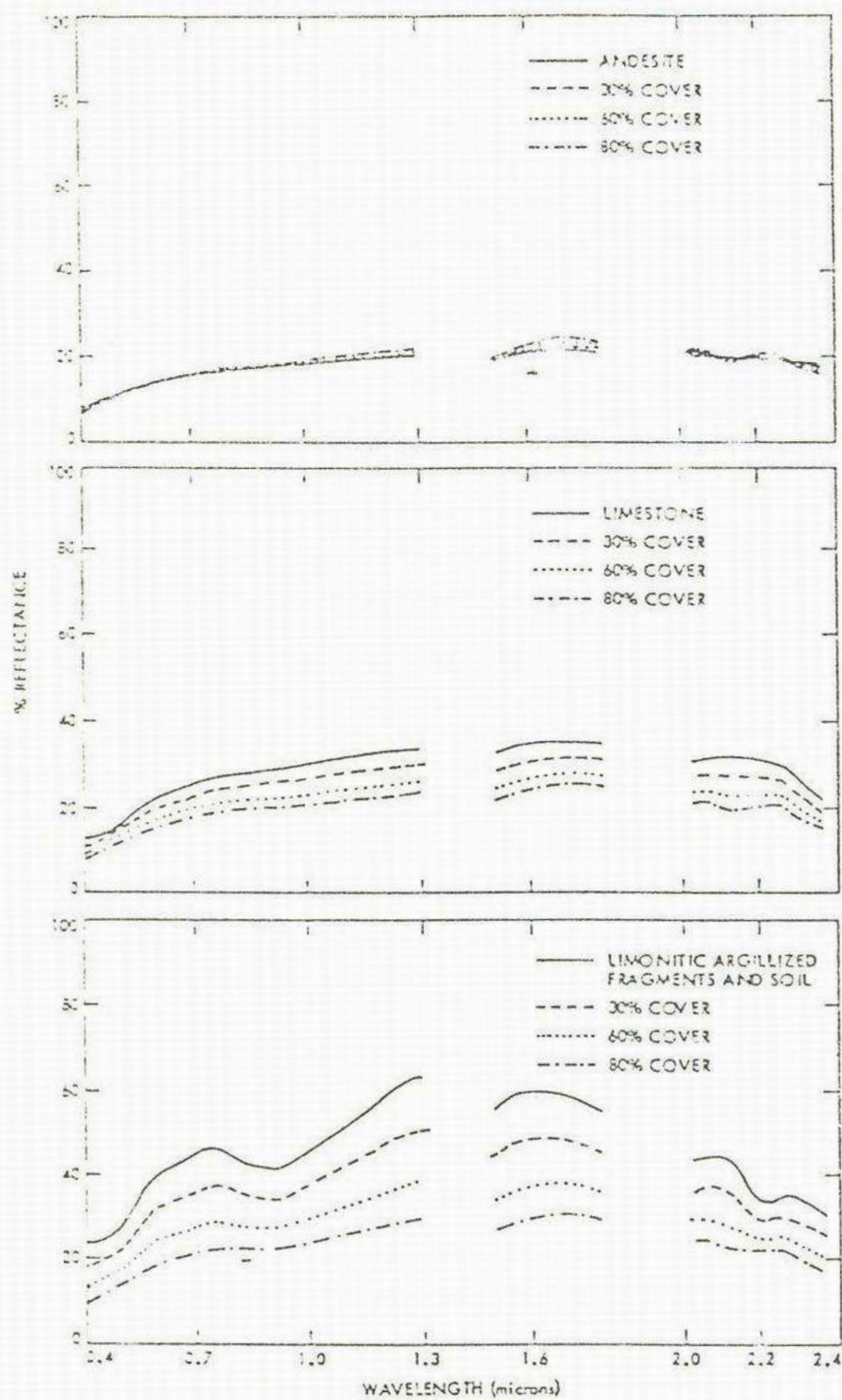
### EFFECT OF GREEN GRASS COVER



**FIGURA 7** Efectos de vegetación de cubierta de pastos sobre los espectros de reflectancia de varios materiales. Tomado de Siegal-Gillespie, 1980.



### EFFECT OF DRY BUSH COVER



**FIGURA 8** Efectos de vegetación de cobertura de arbustos secos sobre la reflectancia espectral de varios materiales. Tomado de Siegal - Gillespie, 1980.



TABLA I

CLASIFICACION Y REGIONES DE LONGITUD DE ONDA PARA LA SEPARACION DE MATERIALES.

MUESTRA	MEJOR LONGITUD DE ONDA				% Correctamente clasificado.	% De otros materiales en columna
	1	2	3	4		
Basalto	0.75	0.40	1.1	2.3	100	16
Andesita	2.3	1.2	2.4	2.0	100	19
Andacita	1.7	2.4	0.4	0.45	89	25
Óxido latita	1.2	2.1	0.55	1.3	86	15
Toba riolítica	1.6	2.4	0.60	0.6	98	14
Taliza	0.7	2.2	2.4	2.3	100	6
Shale	2.1	1.1	2.4	2.3	91	16
Playa	0.45	0.55	0.4	0.5	95	0
Escombros	2.0	1.3	1.7	1.6	94	0
Pocas Alter	1.6	2.2	0.65	2.1	87	2
Caliza cálica	1.0	0.4	0.5	0.55	100	22
Mármol limonítico	2.2	2.4	1.7	2.3	94	0



El análisis de datos espectrales de campo, puede utilizarse para determinar la separabilidad de unidades litológicas y para seleccionar imágenes en las regiones espectrales y así optimizar las diferencias litológicas.

#### 5.- Lineamientos en imágenes Landsat.

Las fallas y fracturas en las rocas constituyen comúnmente guías para diagnosticar la ocurrencia de aguas subterráneas, hidrocarburos y mineralizaciones. La disposición, patrones y densidad de estas, son también importantes para estudios de terremotos, deslizamientos, seguridad de presas, seguridad en asentamientos humanos, etc..

Las fallas y fracturas de las rocas están expresadas comúnmente como lineamientos, en las imágenes tomadas desde el espacio. Los lineamientos fueron bien definidos por O Leary et.al al. (1976), como "fenómenos lineares mapeables, simples o compuestos de una superficie, cuyas partes están alineadas de manera rectilínea o en curva, que difieren de los patrones de fenómenos adyacentes y presumiblemente reflejan un fenómeno subsuperficial". La expresión de los lineamientos en superficie está determinada por una variedad de elementos del paisaje, que incluyen: lineamientos topográficos, del drenaje, de la vegetación y/o tonalidades del suelo o roca. Algunos lineamientos son continuos y otros parecen tener continuidad debido a la fusión natural que trata de producir el ojo humano. Un cuidadoso examen de las imágenes, sin embargo, demuestra que casi todos los lineamientos son discontinuos.



Durante el proceso común de interpretación de lineamientos, un investigador examina una imagen como segmentos lineales espaciados que parecen estar alineados. Este proceso es subjetivo y el resultado depende en su mayor parte del investigador y el propósito de la investigación. En general, los lineamientos que no han tenido un chequeo de campo serán siempre controvertidos.

5.1.- Análisis de lineamientos. La metodología general para efectuar el análisis de lineamientos, incluye los siguientes pasos:

1).- Mapear todos los lineamientos que parecen estar controlados geológicamente.

2).- Excluir los lineamientos que no posean carácter tectónico.

3).- Determinar si los lineamientos están relacionados a procesos de fallamiento o plegamiento.

4).- Determinar si la estructura tectónica es activa o no.

Con las técnicas de procesamiento digital de imágenes se ha modificado el método a seguir. Actualmente, el método ideal involucra el uso de imágenes multitemporales, multibanda, con multiformato, polarizadas e imágenes con realce de lineamientos mediante técnicas digitales o técnicas ópticas.

5.2.- Criterios usados en el análisis de lineamientos con significado geológico. Los lineamientos detectados en las imágenes Landsat pueden ser o no de naturaleza geológica. Estos, pueden indicar fallas, diaclasas, zonas de falla,



estratificación o pliegues.

En los siguientes casos un lineamiento puede ser indicativo de una falla o fractura.

- 1).- Limite rectilíneo de una playa.
- 2).- Curso recto de un río.
- 3).- Lineamiento de vegetación.
- 4).- Lineamiento en la unión entre dos bloques adyacentes con tono y patrón de drenaje diferentes.
- 5).- Cambios abruptos de formaciones geológicas.
- 6).- Cambios de pendiente.
- 7).- Lineamiento definiendo cambio abrupto de elevación.
- 8).- Cambio abrupto rectilíneo en la dirección del drenaje.
- 9).- Lineamiento visible a través de topografías diferentes.
- 10).- Lineamiento asociado al desplazamiento abrupto de unidades geológicas.
- 11).- Cambio abrupto en el curso de un río u arroyo.

### 5.3.- Lineamientos y depósitos minerales.

Es evidente que la red estructural de la corteza terrestre tiene una estrecha relación con la distribución de las acumulaciones minerales. Los lineamientos tectónicos son la expresión superficial de estructuras de ruptura y lógicamente tendrán relación con dichas acumulaciones minerales.

En los sistemas compresionales, las rupturas dan lugar a zonas de cizallamiento y a una liberación súbita de presión,



provocando así condiciones ideales para el entrapamiento de soluciones hidrotermales. Por otro lado, la relación más importante de las mayores estructuras de ruptura con las acumulaciones de minerales, es su inherente asociación con las fracturas muy profundas, que sirven como conductos de magma y de los flujos hidrotermales. Sin embargo, la presencia original de elementos cuya distribución inicial puede no tener relación con las estructuras más tarde activas, determinarían la presencia de acumulaciones minerales. Por consiguiente, reconociendo incluso que la fase inicial de concentración de algunos depósitos está estrechamente relacionada a estructuras bien definidas, se requiere información adicional para su localización.

#### 5.4.- Análisis de curvilineamientos.

La morfotectónica es la base para el estudio de estructuras geológicas mediante la observación de imágenes obtenidas desde satélites. La Morfotectónica trata el estudio de las geoformas con significado geológico.

Los curvilineamientos son geoformas circulares o elípticas, relacionadas algunas veces a procesos magmáticos, como son el desarrollo de calderas volcánicas (estructuras calderas), y que a su vez estas pueden estar relacionadas a los intrusivos subvolcánicos que son la fase más interna de la estructura o a la roca microcristalina, que bien puede ser la roca volcánica propiamente dicha que está asociada a la parte externa de la estructura. Por otro lado estas geoformas, también pueden estar asociadas a los procesos de intrusión de plutones igneos, contándose este evento dentro de los procesos magmáticos.



Hay otros procesos de intrusión, que no tienen relación con eventos magmáticos y que sin embargo presentan el desarrollo de iguales geoformas. Estos son los eventos de intrusión de los domos salinos, que en algunas ocasiones se relacionan con yacimientos de hidrocarburos.

Otro proceso que presenta cierta similitud al desarrollo de calderas (por lo menos en la geoforma que se puede presentar en la imagen), es el proceso de "karstificación" de algunas rocas carbonatadas. Estas estructuras circulares y elípticas, como son los "cenotes", pudieran presentar cierta semejanza a las ya antes mencionadas.

Por último, se puede mencionar también a los pliegues circulares, que pueden ser como una consecuencia de los procesos de las intrusiones ígnea y salina.

En el análisis estructural y morfotectónico se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

1).- La homogeneidad estructural esta relacionada inversamente con la escala.

2).- Las estructuras están relacionadas con las deformaciones o el tipo de fenómeno que las originó.

3).- Existe una profunda relación entre estructuras y geomorfología, dependiendo por supuesto de varios factores como: composición de la roca, propiedades físicas y químicas, clima, vegetación, etc..

4).- El estado inicial de una estructura puede estar afectado por estructuras sobrepuestas.

5).- La simetría de pliegues o fallas está relacionada a



la simetría de movimientos o esfuerzos deformativos.

6).- La información más precisa y adecuada de una estructura está en función de la escala y tamaño.

6.- Ventajas y limitaciones en la observación de imágenes Landsat.

La visión sinóptica que poseen las imágenes Landsat (aprox. 35 000 Kmts. cuadrados), constituye una ventaja en la detección de pliegues individuales y cadenas plegadas. El objeto primordial del estudio regional de pliegues estará orientado hacia el análisis de estilos estructurales, dominios estructurales y análisis tectónico para determinar orientación, intensidad, consecuencia y origen de esfuerzos deformativos. Otra ventaja es la facilidad de detección de plegamiento en terrenos de densa vegetación y el mapeo más rápido.

Entre las limitaciones tenemos: la dificultad para precisar buzamientos de estratos o fallas, dificultad en terrenos peneplanizados para la diferenciación de anticlinales y sinclinales.

7.- Selección de imágenes.

Existe una vasta gama de productos para escoger. Generalmente se encuentran más al alcance, las copias en papel blanco y negro de escala 1 : 1 000 000, las composiciones en falso color de igual escala y ampliaciones fotográficas en escalas de 1 : 500 000 y 1 : 250 000. Se puede agregar además las cintas compatibles con computadora de menor uso debido a sus altos costos.



## 8.- Resolución de imágenes.

Las imágenes Landsat TM (mapeador temático), poseen la mejor resolución espectral. La banda 7 (2.08 - 2.35 micrómetros) fué diseñada específicamente para aplicaciones geológicas. El Landsat TM posee mejor resolución espacial (30 mts) que el sistema Landsat MSS (Barredor multiespectral/ resolución 79 mts.).

9.- En ambientes poco favorables, las imágenes no suministran adecuada información para producir mapas de reconocimiento. Se debe pensar entonces en imágenes de satélite de alta resolución y que además estén procesadas digitalmente.

Las técnicas de procesamiento digital de imágenes de la superficie terrestre han tenido un acelerado desarrollo a partir del año 1970. La aplicación de técnicas de procesamiento digital en numerosas investigaciones geológicas han producido buenos resultados.

Los objetivos del procesamiento digital de imágenes de satélite tienen como fin:

- a).- La restauración de la imagen.
- b).- El mejoramiento o realce de contraste de las imágenes
- c).- Aplicaciones de métodos de extracción y clasificación de la información.

Los procesamientos digitales de interés en geología están orientados principalmente al realce de contrastes de tono



o de color y al realce de lineamientos.

#### 9.1.- Realce de litologías.

Mediante diversas técnicas de procesamiento digital de imágenes para el realce de contrastes, se obtiene una diferenciación más precisa y detallada de unidades litológicas. Los métodos utilizados se aplican banda por banda. A continuación se enumeran las principales técnicas:

- a).- Realce de contraste.
- b).- Proporción de bandas.
- c).- Transformación de componente principal.
- d).- Ecuilización de histograma.
- e).- Expansión lineal.
- f).- Expansión Gaussiana.
- g).- Expansión especial.
- h).- Expansión sinusoidal.
- i).- Agrupación de densidades.

#### 9.2.- Realce de lineamientos.

Varios métodos objetivos para realce, extracción o delineación de lineamientos son posibles. Se han desarrollado métodos de procesamiento de "realce espacial", que tratan específicamente de resaltar o suprimir contrastes locales que tienen orientación direccional como líneas o lineamientos. El aspecto textural de la imágenes es cambiado. Para estos procesos se usa el término "filtración", dentro de estas técnicas se tienen las siguientes.



- a).- Filtro de paso alto.
- b).- Filtro de paso bajo.
- c).- Filtros direccionales.



## 7.- Geología Estructural.

Teniendo afloramientos rocosos desde el Precámbrico hasta el Reciente, es natural que el área de estudio presente una geología estructural bastante complejo, reflejando con esto, que la región sufrió varios eventos tectónicos, los cuales complican su historia.

En el análisis de la imagen del sensor "Mapeador Temático" del Satélite Landsat dada la escala, es un tanto difícil reconocer estructuras menores. Se reflejan preferentemente estructuras de gran escala en su mayoría, es por esta razón que el trabajo esta complementado con una fotointerpretación parcial del área de estudio.

Al analizar el drenaje principal, se observa que aproximadamente en el centro de la imagen destaca un fuerte lineamiento del Río Magdalena, localizado en la sección de Caborca-Trincheras, con un rumbo de NW 30 SE, este mismo lineamiento se prolonga hacia la región de Cucurpe conservando la misma orientación. A la altura de Caborca se hace menos visible este rasgo geomorfológico, pero se alcanza a apreciar una bifurcación, una tendencia que conserva la misma orientación pero con una variación, siendo ahora de NW45SE, y otra que cambia bruscamente de rumbo hacia el SW, presentando ahora una orientación NE45SW. A este gran rasgo geomorfológico alineado NW-SE, se le nombra con fines de localización como "Lineamiento Caborca" Fig. 10.



El "Lineamiento Caborca" marca la separación de dos grandes dominios: Un dominio Norte, con un tren de orientación de sus rasgos morfoestructurales predominantemente NE-SW y otro dominio sur, donde la orientación que predomina es de NW-SE.

Destacan dos rasgos morfoestructurales mayores en el dominio Sur: Lineamiento "La víbora" con un rumbo general aproximado de NW 60 SE, y el Lineamiento "El Viejo" con rumbo de NW 30 SE, esto puede ser observado en el plano estructural.

El análisis de los lineamientos que representean fallas y fracturas, estan ampliamente distribuidos en el área y pertenecen a varios tipos.

Las fallas de cabalgadura se presentan en ambos lados de el Lineamiento Caborca. En el norte esta representado por el cabalgamiento de las unidades del Jurásico Medio-Superior sobre las rocas de edad Cretácica y más jóvenes, esto se observa en las Sierras el Batamote, el Chanate, Cerro el Alamo, Puerto el Alamo, Sierra la Gloria, Sierra la Basura. En el sur esto se representa por el cabalgamiento de las secuencias clásticas y carbonatadas del Precámbrico Superior y Paleozoico Inferior, sobre las rocas sedimentarias Jurásicas y las metamórficas del Basamento, esto se observa en las Sierras: La Jojoba, Chino y Rajón. Los planos de falla indican esfuerzos compresivos NW-SE.

Las fallas normales se distribuyen ampliamente en toda el área, estas se han dividido en tres grupos o familias.

Una familia NE-SW, esta predomina en el dominio Norte y se observa tanto en las fotografías aéreas como en la imagen de Satélite. Otra familia es la que tiene una orientación N-S y que



corta a las primeras, su distribución es en ambos dominios pero es más frecuente en el Norte. La tercer familia presenta una orientación NW-SE y su mayor distribución esta en el dominio Sur, esta presenta que el control morfo-estructural se de un sistema de Horts-Graven, esto se refleja en el drenaje principal y en la tendencia individual de cada unidad orográfica. Esto se debe al fallamiento normal (extensivo) del Cenozoico Medio-Superior, qque dió origen a la Provincia de Sierras y Valles.

Es posible reconocer un cuarto patrón o familia de fallamiento y este se presenta sólo en el dominio sur. Estas son las llamadas fallas transcurrentes E-W ligadas al Sistema de San Andreas, se han reconocido este tipo de fallas en formaciones recientes, lo que demuestra que son estructuras bastante jóvenes.

Habiendose establecido las áreas predominantes de fallamientos y lineamientos, a partir de el análisis morfoestructural y litológico, con el respectivo chequeo de campo se concluye que:

En el Dominio Sur se localizan los afloramientos de lo que viene siendo el zócalo y que corresponde al "Complejo Metamorfico Bamori". En el Dominio Norte no se observan estos afloramientos

En el Dominio Sur se presenta un gran paquete de rocas sedimentarias clásticas y carbonatadas, que corresponden al Precámbrico Superior y Paleozoico Inferior. En el Dominio Norte no se localiza este tipo de rocas.

Las rocas de edad Jurásica sedimentarias y volcánico-sedimentarias, así como las rocas metamórficas de la misma edad



que conforman al "Complejo Igneo-Metamórfico de Santa Ana", afloran en ambos dominios. Además, las características petrológicas y texturales de las rocas sedimentarias y metamórficas, evidencian la presencia de una gran cuenca orientada NW-SE, en la cual se depositaron los sedimentos que originaron a las rocas antes mencionadas.

Las rocas volcánicas y volcánosedimentarias de las Sierras: El Alamo, La Gloria, El Batamote, Chino-Rajón y el Cerro Basura, indican que junto al depósito y relleno de la cuenca ya antes mencionada, existió un arco magmático con una orientación similar a la cuenca, que se localiza en la parte Occidental de Sonora sobre basamento continental (Rangin 1978).

La fuente de aporte los sedimentos que rellenaron la cuenca, son rocas sedimentarias del Precámbrico Superior, Paleozoico Inferior y rocas sedimentarias y volcánicas del Mesozoico Inferior.

Jaques-Ayala (1986) sugiere que la cuenca anterior fue originada en un régimen de transpresión asociada a la falla (megacizalla) Mojave-Sonora.

Rodríguez (1986) menciona que las rocas de la Región de Tuape (Río San Miguel) están intensamente plegadas, falladas y cabalgadas. Parte del modelo tectónico que se presenta en esta región lo relaciona al fallamiento transforme de la megacizalla Mojave-Sonora y al acompañamiento de transpresión a lo largo de esta falla.

En base a las conclusiones primeramente mencionadas, a los datos bibliográficos posteriormente citados y a la localización geográfica sugerida por Anderson y Silver (1974) para el Mojave-



Sonora Megashear Fig. 11 se concluye que:

El "Lineamiento Caborca" mencionado al principio, coincide con el Mojave-Sonora Megashear; que este rasgo geomorfológico podría ser la traza superficial de esa megacizalla y que posiblemente represente actualmente lo que fue el Mojave-Sonora Megashear.

#### 8.- Tectónica.

La morfología actual y los rasgos estructurales, hacen evidente la gran variedad de eventos tectónicos que han ocurrido desde el Precámbrico hasta el Reciente.

Siendo el "Complejo Metamórfico Bamori" el basamento de el área de estudio, entonces el evento que originó a este complejo es el considerado más antiguo. Es referido a un evento de metamorfismo regional y corresponde a la Orogenia "Mazatzal" al final del Precámbrico Temprano y a la Fase Grenville representada por el Granito Aibó.

Un potente espesor clástico-carbonatado se deposita en un ambiente de aguas someras (el cual corresponde a la presencia de estromatolitos) y el aporte detrítico corresponde a la erosión de las tierras emergidas en ese tiempo, este paquete a su vez fue cubierto por la depositación transicional (concordante) por una secuencia predominantemente carbonatada y con aporte clástico, este se considera un bloque estable representando al Precámbrico Superior-Paleozoico Inferior.

En el Paleozoico Superior (Pérmico) el Oeste de Norteamérica se convierte en un margen continental activo como consecuencia



de la apertura del Océano Atlántico Norte y se da lugar la depositación de las unidades triásicas marinas en el margen continental.

La apertura del Atlántico Norte origina la falla transcurrente Mojave-Sonora, a la cual se le asocia la formación de una cuenca dentro de un régimen de transpresión producido por la misma Falla, al Oeste de esta cuenca se forma un arco magmático como consecuencia de la subducción en el Oeste de Norteamérica durante el Triásico-Jurásico, la anterior cuenca es rellenada por el aporte erosivo de las rocas sedimentarias del Pe sup. y el Pz inf., el arco magmático también tiene su aporte a la cuenca de depositación y de esta forma se depositan los sedimentos que constituyen a las rocas del Jurásico Medio-Superior, volcánicas y volcanoclásticas, así como a los volcanoclásticos que por metamorfismo regional forman al "Complejo Metamórfico de Santa Ana" y al "Grupo Coyotillo", este evento está relacionado con la Orogenia Nevadiana.

Ocurre una transgresión marina en el Cretácico Inferior, la cual ocasiona que la cuenca Chihuahuense se prolongue hacia el Oeste, dicha cuenca cubre parcialmente al arco magmático ya antes mencionado.

Esfuerzos compresionales que pliegan a las rocas del Jurásico Medio-Superior y Cretácico Inferior, a la vez hacen cabalgar a las rocas de edad jurásica sobre las cretácicas (Cerro el Alamo), este evento compresivo corresponde a la fase Mesocretácica (Torres y Minjares, 1986), aunque Jaques-Ayala y otros (1988) lo atribuyen a la Orogenia Sevier.



Otro evento compresivo que hace cabalgar a las rocas sedimentarias del Precámbrico Superior y Paleozoico Inferior sobre las rocas Jurásicas y el Zocalo del Precámbrico Inferior. Este evento se presenta en Cretácico Superior-Terciario Inferior y está asociado a la Orogenia Laramide y un magnetismo asociado que provoca la formación de rocas volcánicas y plutónicas de esa edad.

Magnetismo del terciario que provoca el emplazamiento de un conjunto volcánico-plutónico con orientación NNE-SSE.

Seguidamente ocurre el episodio distensivo que produce la apertura del Golfo de California y la formación de la "provincia de Sierras y Valles Paralelos", erosión del relieve de esa época y depositación de las Formaciones Baucarit y Cocospera, fallamiento posterior de esas mismas formaciones.

Acción erosiva de las unidades expuestas, produciendo coluviones, aluviones y terrazas.



## 9.- Conclusiones.

A la luz del trabajo realizado resaltan varias ventajas de la utilizacion de las imágenes espaciales en cartografía geológica, entre otras se tienen:

-- Rapidez en la ejecución del trabajo

En el aspecto cartografico este trabajo a generado una serie de resultados importantes para la geología regional:

El analisis teleanalitico de la imagen utilizada pone en evidencia, claramente una potente secuencia sedimentaria lo que ha permitido a traves del trabajo de campo cartografiar por primera vez una secuencia sedimentaria del Jurásico inferior (Formación Caracahui).

Es difícil reconocer el tipo de contacto entre las distintas formaciones geológicas e incluso la ubicación de algunos contactos se vuelve delicada.

El analisis estadístico del fracturamiento ha permitido proponer por primera vez una carta de lineamientos; frecuentemente se observa el salto aparente de las fallas en muy pocos casos es posible decir si el desplazamiento ha sido horizontal o vertical.

- Se tiene una visión de conjunto que facilita el análisis, esto es ventajoso cuando se realizan estudios de gran cobertura (Como este caso), en los cuales es preciso dar una idea clara de las unidades y su relación a nivel muy general.



- La observación desde un plano superior puede dificultar la identificación de algunos rasgos de los objetos, como buzamiento de estratos.

- Los resultados que se obtienen a partir de la interpretación de la imagen, dan un bosquejo estructural en base a un razonamiento geométrico. De esta manera se hizo una clasificación de los lineamientos en el área de estudio. Dominio Norte, donde la orientación general de los lineamientos tiene un patrón NE-SW. Dominio Sur, aquí el patrón en la orientación de los lineamientos sigue una tendencia NW-SE.

- Se identificaron en el área tres grandes lineamientos:

1 "Lineamiento Caborca", este lineamiento se localiza en el cauce del Río Magdalena y su traza se extiende desde Caborca hasta la región de Cucurpe, siguiendo un rumbo aproximado de NW 5 SE y de Caborca hacia Sonoyta con un rumbo aproximado de NW 15 SE. Generalizando, se puede decir que tiene un rumbo de E-W en todo el plano.

2 "Lineamiento la Vibora", la traza de este lineamiento se prolonga desde la Sierra La Gloria hasta la Sierra El Jojoval al Este del Poblado de Felix Gómez, existen evidencias de su posible prolongación hacia la región de Guaymas. Esto se observó al analizar una composición de imágenes Landsat del Estado de Sonora. El rumbo aproximado de este lineamiento es de NW 60 SE.

3 "Lineamiento el Viejo", este lineamiento se extiende desde la Sierra Del Viejo hasta la Sierra El Jojoval y su rumbo aproximado es de NW 35 SE.



- El método aplicado en este trabajo, demuestra su efectividad al permitir seleccionar (clasificar) zonas con rasgos morfológico-estructurales predominantes.

- El "Lineamiento Caborca" es el rasgo morfo-estructural que divide a los dominios de fracturamiento Norte y Sur ya antes mencionados.

- Al tratar de obtener mapas geológicos a partir de interpretación de imágenes de sensores remotos, es absolutamente necesario tener en cuenta los patrones de reconocimiento geológicos y geomorfológicos.

#### 10.- Recomendaciones.

- Continuar haciendo este tipo de trabajo y así tener una visión más regional.

- La intención de este trabajo era hacer el procesamiento digital de la imagen y como no se realizó, se recomienda hacerlo y de esa manera tener un análisis más detallado en lo referente a el control litológico y así se ubicaran los contactos con más precisión.

- En la zona denominada "Lineamiento Caborca" se recomienda hacer la interpretación de una imagen obtenida por un cubrimiento de radar, porque el radar tiene mayor capacidad de penetración en la capa superficial del suelo de esta forma refleja rasgos internos del mismo, rasgos que no son posible de identificar en una imagen Landsat (TM), como es este caso.



- Sobre la misma zona se recomienda hacer un estudio geofísico, para tratar de definir a profundidad zonas de debilidad o fracturamiento.

- Sería de gran utilidad y se obtendrían magníficos resultados el acoplar y presentar en un mapa, datos geofísicos, datos de radar, procesamiento digital de imágenes y la interpretación visual de imágenes (ésto último ya hecho en este trabajo).



## BIBLIOGRAFIA

- Abadie V. H.. Geology of Mesozoic section, Southern Sierra de Moradillas Sonora, Mexico. Geol. Soc. Amer., Abstr. with Progr., Cordill. Sect. Meeting, Hermosillo (1981), p.41.
- Alencaster, Gloria, 1961, Parte I, Estratigrafia del Triásico Superior de la Parte Central del Estado de Sonora: Univ. Nal. Auton. México, Inst. Geología, Paleont. Mexicana 11, pt. 1, 18 p.
- Alvarez M. Jr.. Notas sobre el Paleozoico Mexicano. Bol. Asoc. Mexicana Geols. Petrols., V. 1, 47-56.
- Alvarez, M., Jr, 1962, Geología Paleogeografía y Tectónica de México. Apuntes UNAM, 170 pgs. México.
- Anderson, Tomas H., Jurassic Magmatism in Sonora, Mexico. Department of Earth and Planetary Sciences, University of Pittsburgh, Pa. 15260, and Silver, Leon T., Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, Ca. 91125, 1978.
- Anderson, Tomas H., The Role of the Mojave-Sonora Megashield in the Tectonic Evolution of Northern Sonora, and Silver, Leon T., Division of Geological and Planetary Sciences, Caltech, Pasadena, California 91125
- Anderson, Tomas H.; Eells, J. H.; Silver, L. T., Rocas Precámbricas y Paleozoicas de la Región de Caborca, Sonora, México. Primer Simposio sobre la Geología y



- Potencial Minero del Estado de Sonora. pp. 5-34.  
Instituto de Geología de la UNAM. Hermosillo, Sonora,  
México, 1978.
- Anderson T. H., Cohen K. K., Schmidt V. A.. Tectonic  
Implication of Initial Paleomagnetic Results from  
Mesozoic Units in Northwestern Mexico. Geol. Soc.  
Amer., Abstr. with Progr., (1981)
- Anderson T. H., Silver L. T.. Late Cretaceous Plutonism in  
Sonora, Mexico and its Relationship to Circum-Pacific  
Magmatism. Geol. Soc. Amer., Abstr. with. Progr., 6,  
p. 484. (1974)
- Anderson T. H., Silver L. T.. Jurassic Magmatism in Sonora,  
Mexico. Geol. Soc. Amer., Abstr. with. Progr., 10, p.  
359-360. (1978)
- Angelier J., Colleta B., Chorowicz J., Ortlieb L., Rangin  
C.. Fault Tectonics of the Baja California Peninsula  
and the Opening of the Sea of Cortez, Mexico. Journ.  
Struct. Geol. (1982).
- Arellano, A. R. V. (1956): Relaciones del Cámbrico de  
Caborca especialmente con la base del Paleozoico: El  
Sistema Cámbrico su Paleogeografía y el Problema de Su  
Base, Tomo II-Parte II; Australia, America (Ed. by  
Jonh Rodgers) 20th International Geol. Congress. pp.  
509-527.
- Atwater T. Implications of Plate Tectonics for the Cenozoic  
Tectonic Evolution of Western North America. Geol.  
Soc. Amer. Bull., 81, p. 3513-3536. (1970).



- Beauvais, L., and Stump, T E., 1976, Corals, molluscs and paleogeography of Late Jurassic strata of the Cerro Pozo Serna: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, V. 19, p. 275-301.
- Brunner P., Microfasies y Microfosiles Permo-Triásicos en el área de el Antimonio, Sonora, Mexico. Rev. I.M.P., 11, 1. (1979).
- Brunner P., Estudio Estratigráfico del Devónico en el área del Bisani, Caborca, Sonora, Mexico. Rev. I.M.P. p. 7. (1975).
- Chaulot-Talmon J., Etude Geologique et Structurale des Ignimbrites du Tertiaire de la Sierra Madre Occidentale, entre Hermosillo et Chihuahua, Mexique. These du Doctorat. Univ. du paris Sud, 259 p.
- Callmus, Thierry., La Frontera entre las Placas Norteamérica y Caribe: Estructuras Principales y Evolución Cenozoica. Bol. Depto. Geol. Uni-Son 1986, Vol. 3, No 1, pp. 19-37.
- Coney, Peter J., Mesozoic-Cenozoic Cordilleran Plate Tectonic. Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721. Geological Society of America, memory 152.
- Coney, Peter J.; Campa M. F., Terrenos Sospechosos de Aloctonia y Acreción del Occidente y Sur del Continente Norteamericano. Bol. Depto. Geol. Uni-Son, Vol. 1, No I, pp. 1-24, 1984.
- Coney P., Plate Tectonic and the Laramide Orogeny. New Mexico. Geol. Soc. Spec. Pub. No. 6. (1976).



- Corona, F. V., Preliminary Reconnaissance Geology of Sierra La Gloria and Cerro Basura, Northwestern Sonora, Mexico. Guidebook-Field Trip No. 27, Geol. Soc. Amer. Ann. Mtg. pp. 32-48. (1979).
- Corona, F. V., Anderson, T. H., Stratigraphy and Structure of Jurassic (?) sequence at Sierra La Gloria and Cerro Basura, Northwestern Sonora, Mexico. Geol. Soc. Amer., Abstr. with. Progr., Cordill. Sect., Hermosillo, p. 50. (1981).
- Cooper G. A., Arellano A. R. V. Stratigraphy near Caborca, NW de Sonora, Mexico. Amer. Ass. Petr. Geol. Bull, 30, p. 606-611. (1946).
- Cooper G. A., Dumbar C. O., Duncan H., Miller A. K., Knight J. B.. Permian fauna at El Antimonio Western Sonora, Mexico. Smiths. Misc. Coll., 119, 106 p. (1953).
- Damon, Paul E; Shafiqullah M.; Clarck, Kenneth F, Evolución de los Arcos Magmáticos en México y su Relación con la Metalogénesis. Univ. Nal. Auton. México. Inst. Geologia, Revista, Vol. 5 Num. 2 (1981) p. 223-238.
- Damon, P. E., Livingston D. E., Mauger R. L., Gioletti B. J. and Pantoja A. Jerjes.. Edad del Precámbrico anterior y de otras rocas del Zócalo de la Región de Caborca-Altar de la parte Norooccidental del Estado de Sonora. Bol. Inst. Geol. UNAM. No. 64, pte. 2, pp. 11-31. (1962).
- De Jong K. A., Escarcega-Escarcega J. A.. Thrust faulting, folding and backsliding in the Cerros Pitiquito, Near



- Caborca, NW Sonora, Mexico. Geol. Soc. America. Abstracts with programs, v. 18, p 100. (1986).
- De Jong, Kees A.; Escarcega, A; Damon, Paul E., Westward Backsliding in the Sierra la Vibora, Sonora, México. pp. 1-9.
- De Jong K. A., Jaques-Ayala C., The Mojave-Sonora Megashear, near Caborca, Sonora: A mayor fault, but not necessarily a Jurassic strike-slip fault. Geol. Soc. America., Abstracts with. Programs, v. 18 (in press). (1986).
- Dickinson, William R., Plate Tectonic Evolution of the Southern Cordillera. Laboratory of Geotectonics, Department of Geosciences, University of Arizona Tucson, Arizona. 85721, USA. pp. 113-133.
- Dickinson, William R, and Coney, Peter J., Plate Tectonic Constrains on the Origin of the Gulf of Mexico. Department of Geosciences, University of Arizona Tucson, Arizona 85721 pp. 27-36.
- Dumble, E. T., Notes on the Geology of Sonora, Mexico. Amer. Inst. Min. Eng. Trans., 29, p. 127-152. (1900).
- Dumble, E. T., Triassic coal and coke in Sonora, Mexico. Geol. Soc. America Bull., v. 11, p. 10-14. (1900)
- Drewes, Harald., The Cordilleran Orogenic Belt Between Nevada and Chihuahua. Geological Society of America Bulletin, V. 89, p. 641-657, 4 figs., May 1968, Dec. No. 80501.
- Epiard-Moreau L., Signatures Spectrales et Cartographie geologique par teledetection spatiale: utilisation des



- donnes Landsat pour l'etude d'un secteur du Sonora, Mexique. These de Doctorat de l'Univ. Paris 6, 7, Juillet 1986.
- Fries C., Reseña Geológica del Estado de Sonora con énfasis en el Paleozoico. Asoc. Mexicana de Geólogos Petroleros, Bol. 14, pp. 257-273. (1969).
- Gastil, Gordon R.; Krummenacher, D., Reconnaissance Geology of Coastal Sonora Between Puerto Lobos and Bahía Kino. Geological Society of America, Bulletin, V. 68, p 189-198, 6 figs., February 1967 Dec. No. 70204.
- Gonzalez, Carlos., La Formación Antimonio (Triásico Superior-Jurásico Inferior) en la Sierra del Alamo, Estado de Sonora. Univ. Natl. Auton. México. Inst. Geología, Revista, Vol. 4, Num. 1 (1980) p. 13-18.
- Hardy, L. R., 1972, Geology of an allochthonous Jurassic sequence in the Sierra de Santa Rosa, northwest Sonora, Mexico (MS Thesis); San Diego, San Diego State Univ., 92 p.
- INEGI (S.P.P.) Geología de la República Mexicana Vol. 1, México 1984.
- Imlay R. W., Paleogeographic studies in northwestern Sonora, Mexico. Geol. Soc. Am. Bull., v. 50. p. 1723-1744. (1939).
- Jaques-Ayala C., Sierra al Chanate, northwestern Sonora, Mexico: Stratigraphy, sedimentology and structure. Tesis de Maestría,. Universidad de Cincinnati, Ohio. (1983).



- Jaques-Ayala, Cesar and Potter, P. E. , 1987, Stratigraphy and paleogeography of Lower Cretaceous rocks, Sierra el Chanate north west Sonora, Mexico: Arizona Geological Society Digest, V. 18, p. 203-214.
- King, R. E., 1939, Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental de Mexico: Geol. Soc. America Bull., v. 50, p. 1625-1727.
- Longoria, J. F., 1986, Reply to comment on "Tectonic Transpression in the Sierra Madre Oriental": Geology, V. 14, p. 809-810.
- McComb, T. D., 1987, Structural Geology of Southeastern Sierra el Batamote ( Northwestern Sonora, Mexico) (MS Thesis): Cincinnati, Ohio, University of Cincinnati, 111 p.
- Merriam, R., 1965, San Jacinto fault in northwestern Sonora, Mexico: Geol. Soc. America Bull., v. 76, p. 1051-1054.
- 1972, Reconnaissance geologic map of the Sonoyta Quadrangle, north west Sonora, Mexico: Geol. Soc. America Bull. v. 83, p. 3533-3536.
- Minjares Sosa, J. L., Torres Lopez, Y.. Geologia del área Bacanora-Arivechi.- Hacia un Esquema de Evolución Geológica Jurásico-Cretácico de Sonora. Tesis Profesional, Uni-Son., Depto. de Geol. 1987.
- Morales M., Mariano. Bosquejo Geológico del Cuadrangulo "Estación Llano-Imuris". Bol. Depto. Geol. Uni-Son, Vol. 1, No. 1, pp. 25-49, Sept. 1984.
- Morales M., Mariano. Geologia Regional de las Areas de Santa Ana y La Ciénega con Enfoque en la Estratigrafía y



- Estructura. Tesis Profesional, Universidad de Sonora, 1982.
- Noll J. H., Geology of Picacho Colorado Area, Northern Sierra de Cobachi, Central Sonora, Mexico. Thesis of Northern Arizona University, (1981)
- Palafox, Juan J.; Martinez, Jose A., Estratigrafia del Area de Arivechi, Sonora. Bol. Depto. Geol. Uni-Son, Vol. 2, No. 1 y 2, pp. 30-59, Dic. 1985.
- Pérez S., Efran., Carta Metalogenética de Sonora. Escala 1:250 000, Una Interpretación de la Metalogenia de Sonora. Gob del Estado de Sonora. Dirección de Minería Geología y Energéticos, Depto. de Geología Uni-Son Julio de 1985, Hillo., Son.
- Radelli, Luigi., Callmus, Thierry. Suture et Nappes D'age Nevadien Sur la Bordure Sud du Colorado (Colorado, Arizona, USA; Sonora, Mexico). Geologie Alpine, T. 64, 1988.
- Radelli, Luigi., An Essay on the Southern Basin and Range. Bol. Depto. Geol. Uni-Son, 1986, Vol. 3, No. 1, pp 51-146.
- Radelli, Luigi; Rodriguez, Patricia; Ornelas S., Ramón. Origin of Some Geomorphologic Lineaments and Curvalineaments of Central Sonora (Northwestern Mexico). Bol. Depto. Geol. Uni-Son, Vol. 2, No. 1 y 2, pp. 1-8, Diciembre de 1985.
- Raisz E., Landforms of Mexico. Morphological map prepared for the geography Branch of the Office of Naval



- Research, Cambridge, Mass., USA. (1964).
- Rangin, Claude., Consideraciones Sobre la Evolución Geológica de la Parte Septentrional del Estado de Sonora. Libreto Guía, Primer Simposio Sobre la Geología y Potencial Minero en el Estado de Sonora. Inst. Geol., UNAM. 1978.
- Rangin, Claude., Sobre la Presencia del Jurásico Superior con Amonitas en Sonora Septentrional. Univ. Nat. Auton. México. Inst. Geología, Revista, Vol 1, Num. 1 (1977), p. 1-4.
- Rangin, C., Cordova, D. A., 1976, Extensión de la Cuenca Cretácica Chihuahuense en Sonora Septentrional y sus Deformaciones: III Congreso Latino Americano de Geología, México, pp. 114.
- Rodríguez, José L., Interpretación del Contacto Jurásico-Cretácico en Sonora Este-Central. Estación Regional Noroeste del Instituto de Geología de la UNAM.
- Rodríguez, José L., Notas sobre la Geología del área de Hermosillo, Sonora. Univ. Nat. Auton. México. Revista, Vol. 5, Num. 1, (1981), p. 30-36.
- Roure, Francois.; Sosson, Marc., Late Jurassic Collision Between a Composite Exotic Block and The North American Continent a Model for The Cordillera Building. Bull. Soc. Geol. France, 1986, (8), T. 11, No. 6, p. 945-959.
- Salas, B. A., 1968, Areal geology and petrology of the igneous rocks of the Santa Ana region, northwest Sonora: Soc. Geol. Mexicana Bol., v. 31, p. 11-36.



- Stewart, John H., Basin and Range Structure: A system of Horsts and Grabens Produced by Deep-Seated Extension. Geological Society of America Bulletin, V. 82, p. 1019-1044, 13 figs., April 1971.
- Stewart J., Mac Manamin., Morales-Ramirez J.. Upper Proterozoic and Cambrian rocks in Caborca region, Sonora, Mexico. Physical stratigraphy, Biostratigraphy and Paleocurrent Studies and Region relations. U. S. Geol. Surv. Prof. Papers, 1309. pp. 1-36. (1984)
- Tardy, Marc.; Carfantan, Jean-Charles.; Rangin, Claude. Essai de Synthèse sui la Structure du Mexique. Bull. Soc. Geol. France, 1986 (8), No. 6, p. 1025-1031.
- Tardy, M., 1980, Contribution a l'etude geologique de la Sierra Madre Oriental du Mexique. These du Doctorat d'Etat, Univ. de Paris, 445 p.
- Tovar R. J., Stratigraphy Study of the Sierra Santa Rita, in the Border Region, Chihuahua and United States, Guidebook Twentieth Field Conference, New Mexico Geol. Soc., p. 165-170 . (1969).
- Wilson I. F., Rocha U. S. Los yacimientos de carbón de la región de Santa Clara, Municipio de San Javier, Sonora. Com. Direct. Invest. Rec. Miner. (Mexico) Bol. 9, p. 108, 8 lam.. (1946).



Resumen.

A. Introducción.

B. Desarrollo histórico de la percepción remota.

1. Percepción remota.

1.1 Definiciones.

1.2 Principios de percepción remota

1.3 Aplicaciones, ventajas y limitaciones.

1.3.1 Aplicaciones.

a). Recursos naturales.

b). Urbanismo.

1.3.2 Ventajas.

1.3.3 Limitaciones.

1.4 Naturaleza de la radiación electromagnética.

1.4.1 Principios generales.

1.5. Propiedades de la radiación electromagnética.

1.6. El Espectro Electromagnético.

1.6.1 Regiones del espectro según las propiedades físicas de la radiación electromagnética.

1.6.2 Regiones del espectro según su utilización en percepción remota.

1.7 Fuentes de energía electromagnética.

1.7.1 Generalidades.

1.7.2 Radiaciones del cuerpo negro.

1.7.3 El sol.



- 1.8. Interacción Energía electromagnética y los cuerpos naturales.
  - 1.8.1 Interacción energía E.M.-Atmósfera.
  - 1.8.2 Interacción energía E.M.-Agua
  - 1.8.3 Interacción energía E.M.-Materiales sólidos.
- 1.9 Detección, transformación y registro de la energía E.M. recibida.
  - 1.9.1 Registro gráfico.
  - 1.9.2 Información digital.
- 1.10. Resolución, detectabilidad y reconocimiento.
2. Clasificación de los sensores remotos.
  - 2.1 Introducción.
  - 2.2 En función de su banda espectral.
  - 2.3 En función de la fuente emisora.
  - 2.4 En función de la ubicación espacial de la fuente emisora y receptora.
  - 2.5 En base a la información registrada.
  - 2.6 En función de los mecanismos utilizados para captar la información.
3. Plataformas utilizadas en percepción remota.
  - 3.1 Orbitas.
4. Relación de la radiación E.M. con algunos cuerpos naturales.
  - 4.1 Emisión de la radiación electromagnética.
  - 4.2 Reflexión de la radiación E.M..
  - 4.3 Reflexión de la radiación E.M. en geología.



5. El Satélite Landsat.
  - 5.1 Reseña histórica.
  - 5.2 Descripción general del programa.
  - 5.3 Control de operaciones.
  - 5.4 Estaciones receptoras.
  - 5.5 Órbitas y recubrimiento.
  - 5.6 M.S.S. (El barredor multiespectral).
    - 5.6.1 Funcionamiento del M.S.S.
    - 5.6.2 Composición de imágenes.
    - 5.6.3 Resolución espectral.
    - 5.6.4 Resolución espacial.
  - 5.7 M.T. (Mapeador temático).
    - 5.7.1 Funcionamiento del sistema.
    - 5.7.2 Resolución espectral.
    - 5.7.3 Resolución espacial.
    - 5.7.4 Tipos de imágenes.
  - 5.8 El Programa Spot.
    - 5.8.1 Estructura del programa.
    - 5.8.2 Órbitas y cobertura.
6. Técnicas para el procesamiento y clasificación de imágenes de sensores remotos
  - 6.1 Estructura básica de la información.
  - 6.2 Bits y pixels.
  - 6.3 Registro y archivo.
  - 6.4 Almacenamiento magnético.
  - 6.5 Características de las imágenes.
  - 6.6 Parámetros de un pixel.



6.7 Parámetros de una imagen

6.8 Diferencias entre procesamiento digital de imágenes y clasificación.

6.9 Procesamiento digital.

6.9.1 Restauración de imágenes.

1). Errores radiométricos.

a). Falta de una línea.

b). Efectos atmosféricos.

c). Ruidos.

2). Distorsiones geométricas.

a). Debido a la rotación de la tierra.

b). Distorsión panorámica.

c). Distorsión geométrica no sistemática.

6.9.2 Mejoramiento de imágenes.

1). Ecuilización de histograma.

2). Mejoramiento de contraste.

3). Filtros espaciales.

4). Definición de límites.

6.9.3 Clasificación de imágenes.

1). Clasificadores de textura.

2). Clasificadores multiespectrales.

7. Algoritmos más usados en la clasificación de imágenes.

7.1 Paralelepípedo.

7.2 Clasificador de la distancia mínima.

7.3 Clasificador del vecino más cercano.

7.4 Clasificador de agrupamiento natural.



## R E S U M E N

### A.- Introducción.

Percepción remota o teledetección son términos corrientes empleados por un gran número de científicos para referirse al estudio de propiedades de objetos colocados a distancia.

Desde su nacimiento, el hombre emplea sus facultades a través de los órganos de los sentidos para captar radiaciones luminosas, ondas sonoras y variaciones de temperaturas correspondientes a un muy limitado rango de radiaciones dentro del espectro electromagnético.

Un creciente interés y necesidad de conocer mejor el planeta en que habitamos y su atmósfera, condujeron al desarrollo de otros sensores que aumentaron considerablemente la capacidad de detección a distancia, por medio de instrumentos especiales montados en aviones o vehículos espaciales.

Así se desarrollaron cámaras aéreas, cámaras multiespectrales, cámaras panorámicas, detectores infrarrojos, barredores multiespectrales, equipos de microondas, magnetómetros, gravímetros, etc., para detección de radiaciones electromagnéticas, que permitieron obtener una mayor, más



completa y más rápida información de los recursos naturales.

Todos estos instrumentos realizan una función conocida actualmente bajo el nombre de percepción remota o sea la adquisición de información de un cierto objeto (o fenómeno) sin estar en contacto físico con él.

Los métodos de percepción remota se basan en el hecho de que cada elemento de la naturaleza tiene su propia y única distribución de radiación emitida, reflejada o absorbida.

Utilizando el sensor adecuado, correspondiente a las características espectrales de cada objeto, será posible distinguir un objeto de otro por sus propiedades físicas y químicas, tamaño y forma.

Sin embargo, en la práctica esta operación no es tan sencilla como parece, ya que los materiales de la naturaleza no se comportan como radiadores perfectos a los cuales se pueden aplicar las leyes correspondientes a "cuerpos negros". A este fenómeno se debe agregar que toda la energía emitida o reflejada por un objeto debe atravesar la atmósfera, y durante este pasaje las radiaciones pueden ser absorbidas, reflejadas o dispersas por la propia atmósfera.

Finalmente, cabe anotar, que cada instrumento utilizado para la operación de percepción remota, recoge y registra la información de una manera diferente, introduciendo variaciones y deformaciones características para cada sistema.



## B.- El desarrollo histórico de la percepción remota

La historia de la percepción remota puede dividirse en dos fases: un primer periodo anterior a 1957 que empieza desde los pasos iniciales hacia la cámara oscura de Aristóteles hace 2300 años. El segundo periodo está marcado por el auge de la era espacial, con la colocación en órbita del primer satélite artificial, el Sputnik-1.

El desarrollo de la fotografía sufrió un gran vuelco cuando Louis Jacques, Mande Daquerre y Joseph Nipnoce en 1839, produjeron las primeras fotografías permanentes con su sistema "daguerotipo" que permitía fijar los haluros utilizando tiosulfitos, con lo cual se formaba una imagen permanente. Luego los perfeccionamientos de sistemas ópticos permitieron obtener fotografías de buena calidad.

Las fotografías precursoras de la actual fotografía aérea fueron obtenidas desde globos cautivos; en 1859 Gaspard Felix Toumachon obtuvo las primeras de estas fotografías sobre la Villa Petit Becetre cerca de Paris, y en 1860 Samuel A. King y James J. Black, obtuvieron fotografías de Boston, Massachusetts desde un globo cautivo a 1200 pies de altitud.

El desarrollo de la aviación en la Primera Guerra Mundial, contribuyó en mucho al desarrollo de la aerofotografía al proporcionar plataformas más adecuadas que los globos para transportar las cámaras.

La Segunda Guerra Mundial aceleró el desarrollo de sistemas nuevos, tales como el infrarrojo termal (tras 125 años de investigación ) y el radar (después de 50 años de



investigación); no obstante, sólo después de esta guerra se lograron los sistemas de respuesta instantánea que fueron los precursores de los actuales barredores óptico-mecánicos, radiómetros y espectrómetros.

El primer sistema de radar aerotransportado, el "indicador de posición" se desarrolló en Gran Bretaña como ayuda contra los bombardeos nocturnos; el desarrollo del radar tubo lugar en Estados Unidos, Alemania y Gran Bretaña; no obstante, fué este último país el primero en utilizar este sistema como detector de aviones y barcos, al inicio de la Segunda Guerra Mundial. La evolución de los sistemas de radar de visión lateral y del radar de apertura sintética ocurrió en el periodo posterior a 1950, el primero desarrollado por la firma Westinghouse y el segundo por la Texas Instruments, ambos con participación de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos. También en este periodo se desarrolló la fotografía infrarrojo color.

El segundo periodo de evolución de la percepción remota, se inicia con el lanzamiento de la primera nave espacial, el Sputnik 1, por la URSS en 1957. La teleobservación sistemática desde el espacio extraterrestre con propósitos civiles, nace con el primer satélite meteorológico Tiros-1. El hombre pudo obtener una visión de la tierra desde fuera de su atmósfera, en 1961 cuando el primer astronauta, Yuri Gagarin describía lo observado como "algo magnífico, se ve la tierra, los bosques, las nubes", desde su nave espacial Vostok 1.

Hasta 1967, los americanos (con vuelos tripulados Gemini y Mercury) y los soviéticos (vuelos Vostok y Voskhod) consideraron las fotografías de la tierra como experiencias anexas, pero no



como sistemas prioritarios, menos aún se buscó el cumplir las especificaciones técnicas en cuanto a precisión de las fotografías obtenidas. En el programa Apolo, las misiones Apolo 6 y 7, tuvieron como misión prioritaria la obtención de fotografías desde el espacio y en 1968, Apolo 9 obtuvo las primeras fotografías con especificaciones geométricas definidas (con 4 cámaras Hasselblad correctamente orientadas).

El programa Landsat a partir de 1972, ha proporcionado una secuencia continua de imágenes que han demostrado plenamente la posibilidad de aplicación de la teledetección, como una herramienta útil y práctica en el estudio de los recursos naturales.

El perfeccionamiento de los sistemas de percepción remota, permite predecir que en el futuro inmediato, un alto porcentaje de los programas de estudios de los recursos naturales se harán con base en imágenes obtenidas desde el espacio extraterrestre, permitiendo, así sea en parte, contrarrestar los efectos de la invasión del espacio extraterrestre por la carrera armamentista.



## 1. PERCEPCION REMOTA.

### 1.1 Definiciones.

Percepción remota o teledetección, es la medición o adquisición de información sobre alguna propiedad de un objeto o fenómeno, por un instrumento de registro que no está en contacto físico o íntimo con el objeto o fenómeno bajo estudio (Manual of Remote Sensing 1983).

Como ésta, es posible encontrar muchas definiciones similares; no obstante, todas ellas coinciden en varios puntos fundamentales; el proceso de percepción remota requiere de:

- Una fuente emisora de energía.
- Un objeto a estudiar.
- Un sistema capaz de captar información.
- Una distancia entre el objeto a estudiar y el sistema que puede captar la información. (Figs. 1 y 2 ).

Sensor remoto, es un instrumento, órgano o sistema que detecta a distancia alguna propiedad de un objeto o fenómeno midiendo algún tipo de radiación o emanación proveniente de él.

La principal base física de la percepción remota, es la capacidad de los instrumentos sensores para medir variaciones espectrales, espaciales o temporales en los cuerpos energéticos.

Los sensores remotos, pueden medir variaciones en:

- Campos de fuerza (magnética y gravitacional):  
Magnetómetros.
- Campos electromagnéticos: Cámaras fotográficas, Radar.



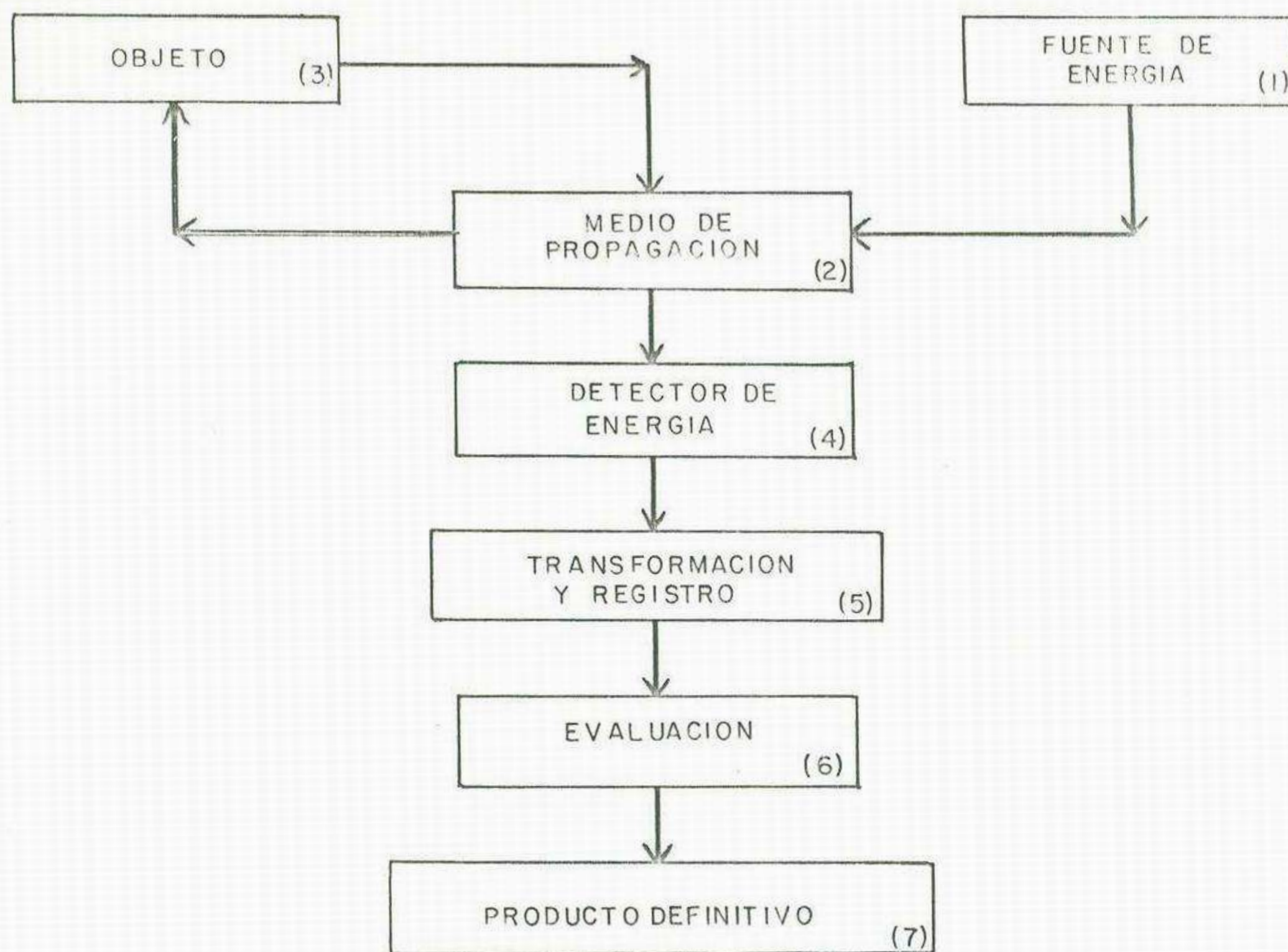


FIGURA 1

DIAGRAMA DEL PRINCIPIO DE ADQUISICION DE DATOS DE PERCEPCION REMOTA

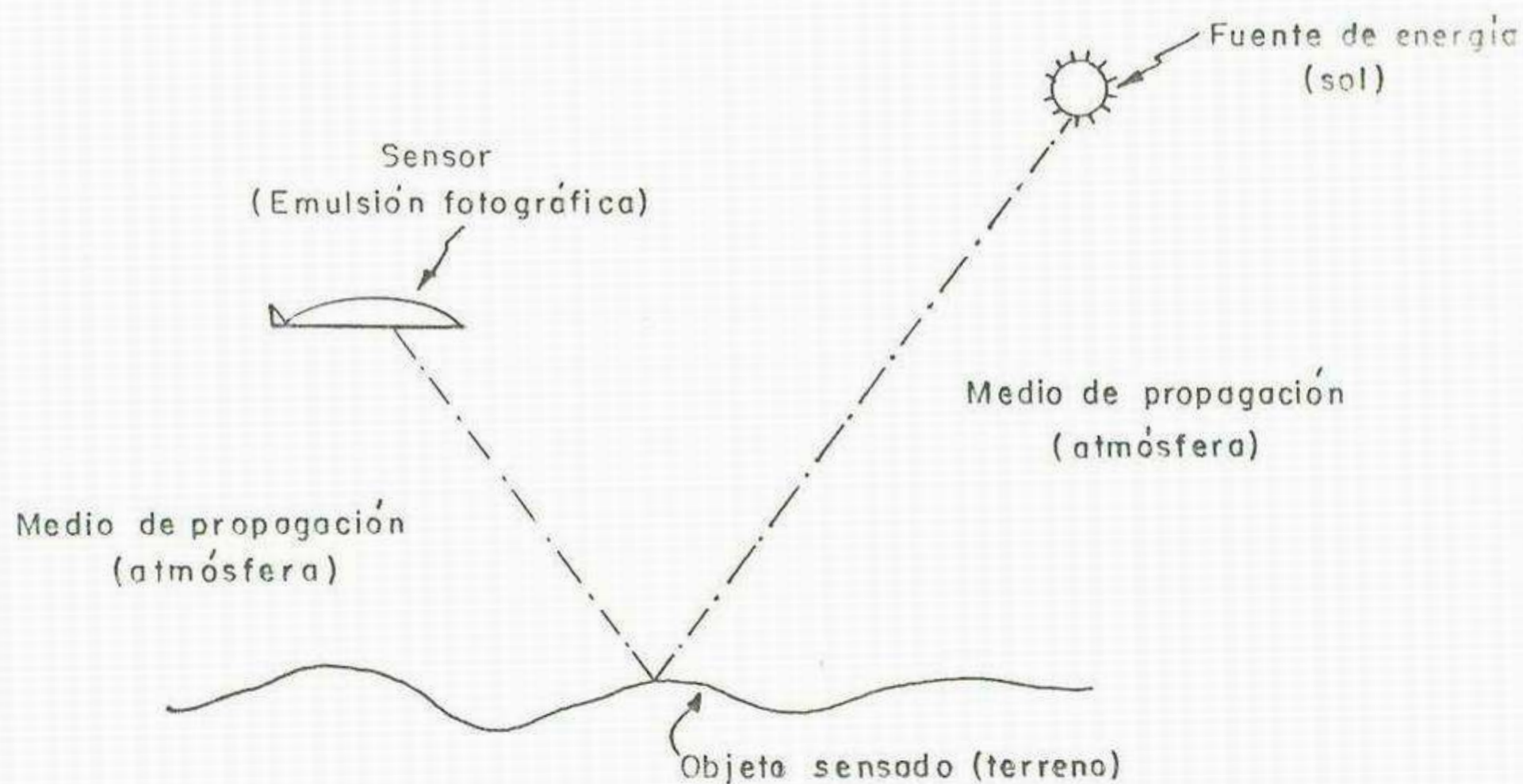


FIGURA 2

TRAYECTORIA DE LA RADIACION PARA LA FORMACION DE FOTOGRAFIAS AEREAS CONVENCIONALES



- Vibraciones acústicas o mecánicas: Sonar.

## 1.2 Principios de Percepción Remota.

La principal base física de la percepción remota es la capacidad de los instrumentos sensores, para medir variaciones espectrales, espaciales y temporales, en los campos energéticos.

Desde el punto de vista de aplicación de la percepción remota al estudio de los recursos naturales, estas fuentes quedarán limitadas al empleo de las ondas electromagnéticas.

Por las propiedades de propagación de estas ondas, el proceso de percepción remota es muy homogéneo para todo el espectro, no siendo necesario por el momento hacer diferenciaciones para una parte u otra de él mismo.

En el estudio de los recursos naturales, los sensores remotos utilizados son aquellos que captan energía en forma de ondas electromagnéticas. Es necesario tener una fuente de energía, que emita la radiación electromagnética, la fuente en este caso es el sol; la energía se transmite a través de un medio, constituido por la atmósfera, incide luego sobre el objeto (terreno), es reflejada para transmitirse a través del mismo medio de propagación; finalmente la energía reflejada, incide sobre el sensor; en este caso la emulsión fotográfica colocada en la cámara.

## 1.3 Aplicaciones, Ventajas y Limitaciones.

### 1.3.1 Aplicaciones.

Las aplicaciones de la teledetección son realmente vastas y cubren una amplia gama del conocimiento humano; entre los campos en los cuales esta ciencia ha tenido mayor aplicación,



se cuentan:

a) Recursos Naturales.

- Vegetación.

- Suelos.

- Agua.

- Geología.

- Agricultura.

b) Urbanismo.

- Proyecciones energéticas.

- Ingeniería Civil.

- Vida silvestre.

- Arqueología.

- Prevención de daños ocasionados por desastres.

- Planificación regional.

- Manejo de praderas.

- Inteligencia Militar.

1.3.2 Ventajas.

Se tiene visión de conjunto que facilita el análisis, esto es ventajoso cuando se realizan estudios de gran cobertura a nivel regional o nacional en los cuales es preciso dar una idea clara de las unidades y su relación a nivel muy general.

Se pueden realizar estudios más eficientes. El hecho de poder observar en conjunto no solo los rasgos del objeto de estudio sino también algunos otros rasgos como obras de infraestructura, permite realizar una planificación más adecuada del trabajo, además, la observación en conjunto permite al



técnico planificar sus observaciones con más certeza.

Mantiene un registro permanente y exacto de las condiciones en el momento de realizar el estudio.

Facilita la actualización de estudios realizados.

Es posible concentrar en un mismo tipo de imagen los resultados de estudios multidisciplinarios.

Es posible hacer mediciones sin ir al terreno.

### 1.3.3 Limitaciones.

No permite evaluar las características internas de los cuerpos naturales.

Su empleo requiere entrenamiento especial del personal técnico.

La observación desde un plano superior puede dificultar la identificación de los objetos y rasgos.

## 1.4 La Naturaleza de la Radiación Electromagnética

### 1.4.1 Principios Generales.

La radiación electromagnética es energía propagada a través del espacio o de medios naturales en la forma de interacción entre campos eléctricos y magnéticos.

Según Maxwell es una forma dinámica de energía, manifiesta, solo por su interacción con la materia.

Según la primera definición dada, la radiación electromagnética puede considerarse compuesta por dos vectores: eléctrico y magnético.

Históricamente, las propiedades de la energía electromagnética fueron explicadas basándose en una teoría corpuscular (Newton) y una teoría ondulatoria.



La energía electromagnética como toda energía se desplaza en el espacio a la velocidad constante de la luz y en forma armónica. Propagación armónica significa que las ondas son repetitivas e igualmente espaciadas en el tiempo.

#### 1.5 Propiedades de la Radiación Electromagnética.

Las ondas electromagnéticas se caracterizan por sus:

- Intensidad
- Frecuencia (longitud de onda)
- Polarización

Aparte de estas características todas las ondas son esencialmente de la misma naturaleza. Una onda electromagnética (Fig. 3 ) se representa por dos vectores perpendiculares indisociables, y por su dirección y velocidad de propagación:

- Campo eléctrico  $E$  y Campo magnético  $H$ , cuya amplitud varía periódicamente en función del tiempo.

- La onda se propaga en dirección  $(c)$  perpendicular al plano de los vectores.

La velocidad de propagación en el vacío es igual a la velocidad de propagación de la luz.

En otro medio esta velocidad es inferior y está determinada por la constante dieléctrica, permeabilidad y conductividad del medio en que se propaga la onda.

#### 1.6. El espectro Electromagnético.

1.6.1 Regiones de el espectro electromagnético según las propiedades físicas de la radiación.



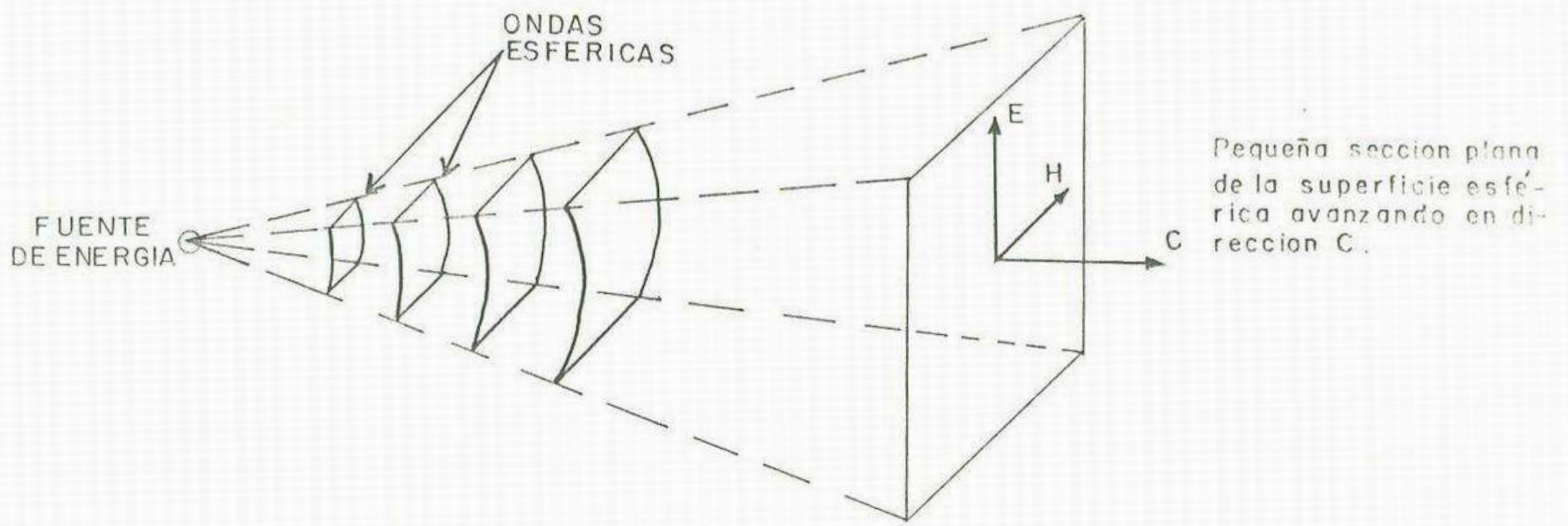


Fig. 3 Propagación de ondas.

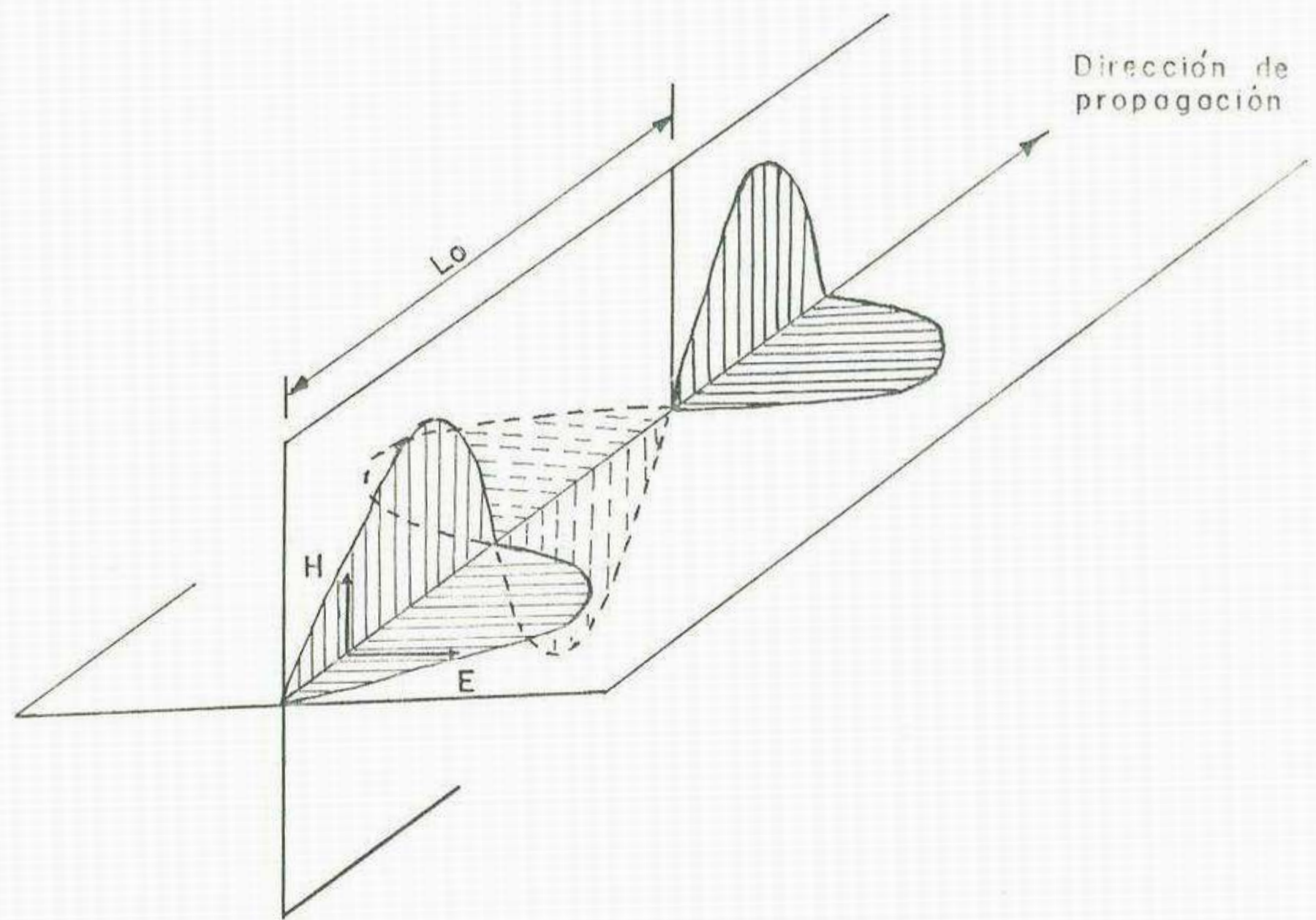


Fig. 3 Esquema de una onda electromagnética linealmente polarizada.



# EL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

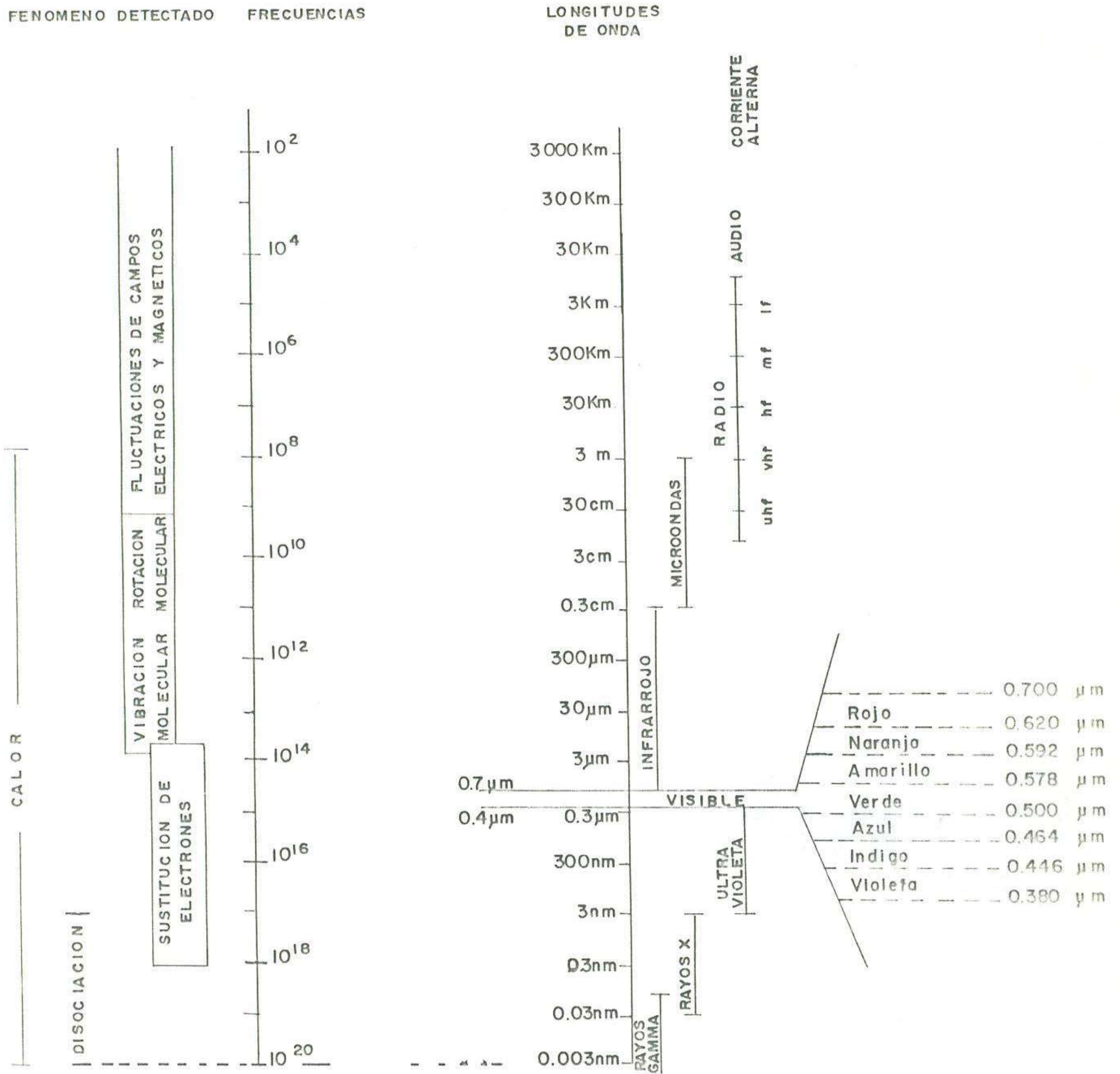


Figura 4 Regiones del espectro electromagnetico según las propiedades físicas de la radiación electromagnética.



El espectro electromagnético es un arreglo continuo de radiaciones, ordenado en función de la longitud de onda o frecuencia. Prácticamente y teóricamente, se ha establecido que el espectro electromagnético incluye longitudes de onda que se extienden desde angstroms hasta kilómetros.

Las frecuencias fluctúan entre  $10^4$  y  $10^{20}$  ciclos por segundo, correspondiendo las frecuencias más bajas a longitudes de onda mayores y las frecuencias altas a longitudes de onda menores.

No existen instrumentos o mecanismos que puedan detectar la emisión de energía a lo largo de todo el espectro, razón por la cual éste ha sido dividido en varias regiones espectrales. La subdivisión es arbitraria y ha sido basada en medios actualmente disponibles para generación y detección de energía.

Por el carácter continuo del espectro, los límites tampoco son fijos y pueden variar según distintos autores.

La figura 4 representa esquemáticamente el espectro electromagnético con:

- I. La subdivisión en regiones, con indicación de longitud de onda y frecuencia.
- II. El tipo de sensor empleado corrientemente para cada banda.

Las diversas regiones del espectro tienen determinadas propiedades y limitaciones.

- Rayos Cósmicos y Gamma. Menos de 0.03 nanómetros.

Radiación proveniente del sol, es completamente absorbida por la atmósfera superior y no es utilizable en percepción



remota. La Radiación gamma proveniente de minerales radiactivos es detectada por instrumentos operantes desde aviones a baja altitud.

- Rayos X, de 0.03 a 3 nanómetros. La radiación proveniente del sol se absorbe completamente por los gases de la atmósfera, por eso no es posible emplearla en percepción remota.

- Ultravioleta (UV), de 3 nanómetros a 0.4 micrómetros. La radiación con longitudes de onda de menos de 0.3 micrómetros es completamente absorbida por el ozono de la atmósfera superior, sólo se usa en percepción remota la región comprendida entre 0.3 y 0.4 micrómetros, denominada ultravioleta fotográfico, el cual puede ser transmitido a través de la atmósfera, es detectable en película y en fotodetectores, aunque la dispersión atmosférica es severa.

- Visible, 0.4 a 0.7 micrómetros. Detectables con películas o fotodetectores. Rango de operaciones de la fotografía convencional. Incluye el pico de reflectancia de la tierra a 0.5 micrómetros. Por ser ésta la única región a la cual es sensible el ojo humano, es la más utilizada en percepción remota.

- Infrarrojo (I.R.), de 0.7 a 14 micrómetros. La interacción con la materia varía según la longitud de onda. Las principales regiones del infrarrojo son:

Infrarrojo reflejado: 0.7-3.0 micrómetros. Es energía reflejada y no contiene información sobre las propiedades térmicas de los materiales a las temperaturas normales en la superficie de la tierra.

Esta región se subdivide a su vez en dos: Infrarrojo



cercano de 0.7 a 1.3 micrómetros e infrarrojo medio de 1.3 a 3.0 micrómetros. Dentro de el infrarrojo cercano se encuentra el límite máximo para operación de sistemas fotográficos (0.9 micrómetros).

Infrarrojo termal: 3.0-14.0 micrómetros. Se subdivide en dos ventanas: 3 a 5 y 8 a 14 micrómetros. Las imágenes para esta región se obtienen con barredores óptico-mecánicos, pero no con películas.

- Microondas, de 0.3 a 300 cms. Las longitudes de onda que se encuentran en este rango pueden penetrar nubes y niebla. Las imágenes pueden adquirirse en forma activa o pasiva. El sensor de microondas más usualmente utilizado en percepción remota es el radar, las longitudes de onda de los sistemas comerciales utilizados en la actualidad son: 0.8 a 2.4 cms. (K), 2.4 a 3.75 cms. (X) y 15 a 30 cms. (L).

Las longitudes de onda superiores a las microondas son utilizadas en transmisiones de radio y redes eléctricas de corriente alterna; en la actualidad no tienen aplicación en la teledetección.

1.6.2 Regiones del espectro electromagnético según su utilización en percepción remota.

Según sus aplicaciones en teledetección, el espectro electromagnético (e.em) ha sido dividido en regiones que difieren de aquellas establecidas según las propiedades físicas de la radiación electromagnética (r.em), Figura 5. Estas regiones son:

- Ultravioleta fotográfico. 0.3-0.4 micrómetros.
- Visible. 0.4-0.7 micrómetros.



REGIONES DEL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO SEGUN SU UTILIZACION EN PERCEPCION REMOTA

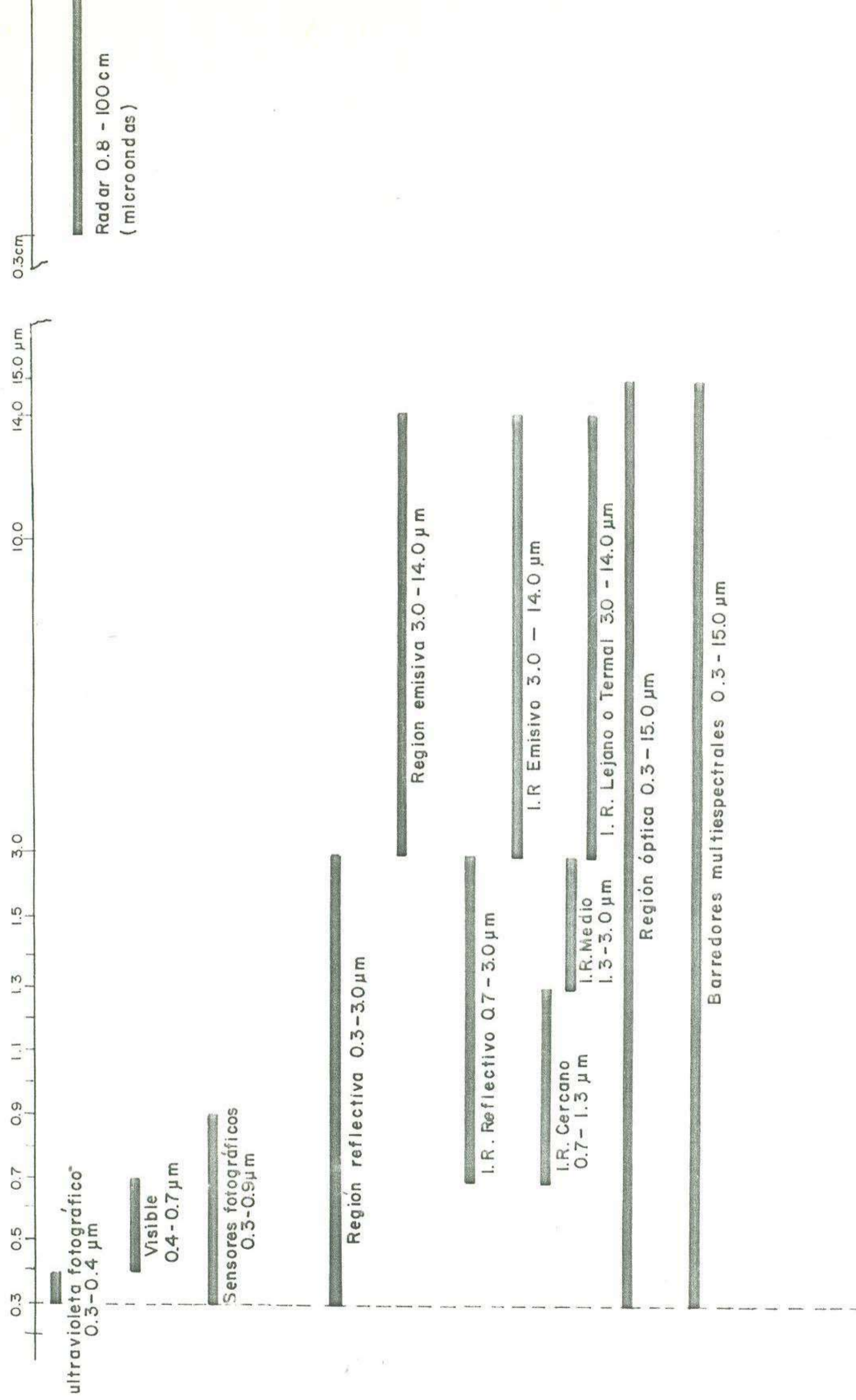


Figura 5 División del espectro electromagnético según su utilización en percepción remota.



- Fotografía, 0.3-0.9 micrómetros.
  - Región reflectiva, 0.3-3.0 micrómetros.
  - Región emisiva, 3.0-14 micrómetros.
  - Infrarrojo reflectivo, 0.7-3.0 micrómetros.
  - Infrarrojo cercano, 0.7-1.3 micrómetros.
  - infrarrojo medio, 1.3-3.0 micrómetros.
  - Región óptica, 0.3-15 micrómetros.
  - Microondas, 0.3-300 cms. (ver figuras 5 y 6 ).
- 1.7 Fuentes de energía electromagnética.

#### 1.7.1 Generalidades.

Las fuentes de energía electromagnética utilizadas para la detección a distancia son dos:

- Fuentes artificiales construidas con fines bien definidos (radar).
- Fuentes naturales, el sol.

Los sensores pasivos aprovechan las fuentes naturales de energía, mientras que los sensores activos utilizan las fuentes artificiales.

Para explicar las propiedades de la energía producida por las fuentes naturales, se ha recurrido a un concepto teórico que es el Cuerpo negro.

#### 1.7.2 Radiaciones del cuerpo negro.

Todo cuerpo emite radiaciones en función de su temperatura y transforma en calor la energía que absorbe.

La intensidad y la distribución espectral de la radiación emitida depende de la temperatura del cuerpo considerado y de su naturaleza.



FIGURA 6

Relación entre bandas y longitud de onda utilizadas en Percepción Remota.

Región	Banda	Longitud de onda
Ultravioleta	UV Intermedio	0.280 a 0.315 $\mu\text{m}$
	UV Cercano (Fotográfico)	0.315 a 0.380 $\mu\text{m}$
Visible	Violeta	0.380 a 0.446 $\mu\text{m}$
	Indigo	0.446 a 0.464 $\mu\text{m}$
	Azul	0.464 a 0.500 $\mu\text{m}$
	Verde	0.500 a 0.578 $\mu\text{m}$
	Amarillo	0.578 a 0.592 $\mu\text{m}$
	Naranja	0.592 a 0.620 $\mu\text{m}$
	Rojo	0.620 a 0.700 $\mu\text{m}$
Infrarrojo	Cercano	0.7 a 1.3 $\mu\text{m}$
	Medio	1.3 a 3.0 $\mu\text{m}$
	Lejano	3.0 a 14.0 $\mu\text{m}$
Micro-ondas (MO)		0.3 a 300 cm



# RANGOS DE LONGITUDES DE ONDA EN LOS SISTEMAS DE PERCEPCION REMOTA

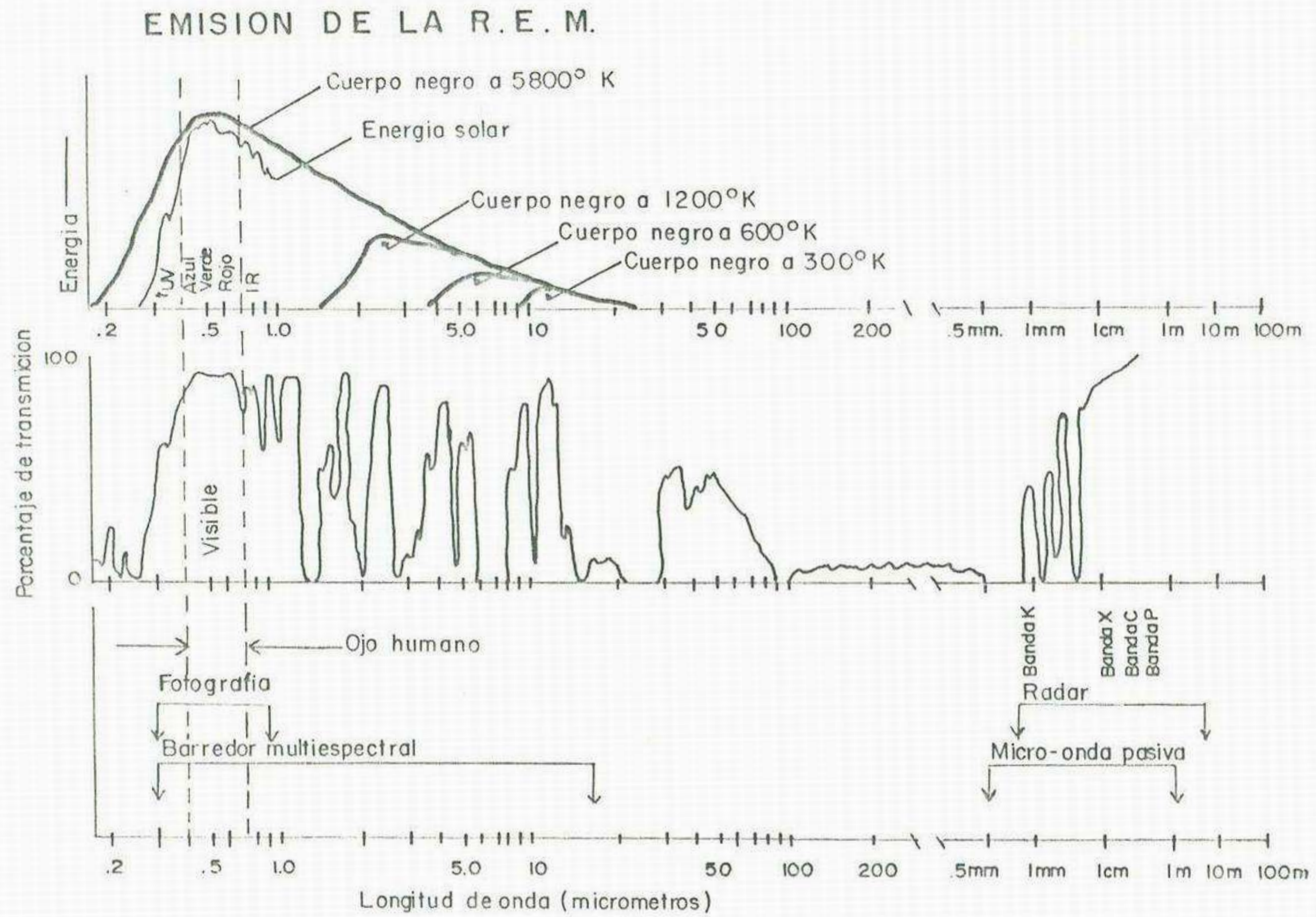


FIGURA. 7



1.8 Interacción entre la energía electromagnética y los cuerpos naturales.

1.8.1 Interacción energía electromagnética -atmósfera.

La propagación de toda radiación electromagnética en el vacío se produce en línea recta y sin absorción. Cuando se interpone en la trayectoria del rayo un medio como la atmósfera, ionósfera o agua, se producen perturbaciones en la propagación. (ver figuras 8 y 9 ).

Estas perturbaciones son selectivas para cada longitud de onda y se deben a:

- Absorción.
- Dispersión (difusión).
- Emisión.
- Refracción.
- Reflexión. (ver figuras 10 y 11 ).

1.8.2 Interacción entre la energía electromagnética y el agua

La propagación de las ondas electromagnéticas en el agua es afectada por los mismos fenómenos que en la atmósfera: absorción, difusión, etc.

Sin embargo, sus propiedades físicas (constante dieléctrica, índice de refracción, etc.), son tan diferentes que también es diferente su efecto. Los fenómenos más significativos son la absorción-transmisión y reflexión.

- Absorción-Transmisión.

La máxima absorción del agua pura, corresponde a las radiaciones infrarrojas y la mínima a la banda del azul-violeta.



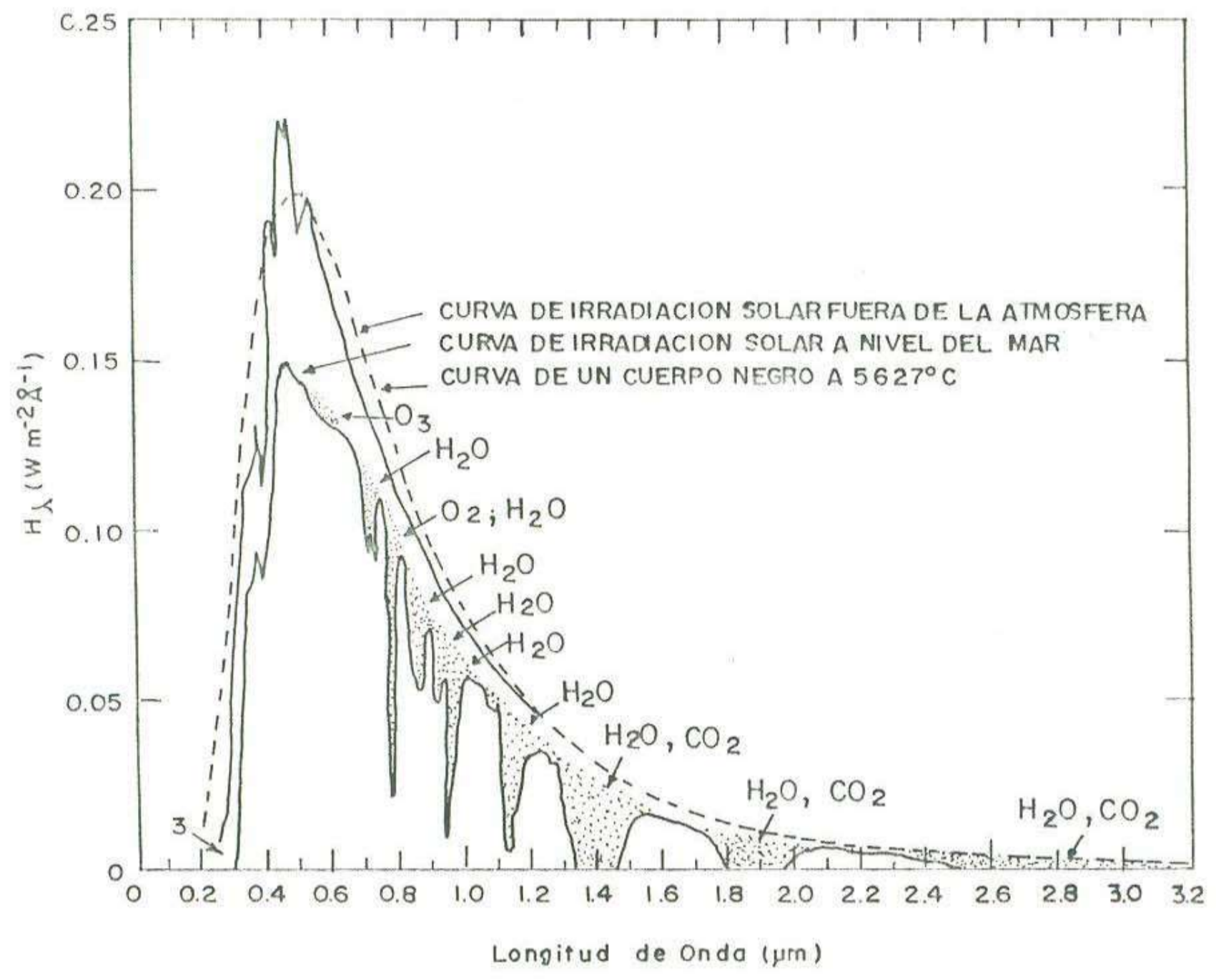


Figura 8 Irradiación espectral ( $H_{\lambda}$ ) para la luz solar directa, antes y después de su paso a través de la atmósfera terrestre. Las áreas punteadas corresponden a la absorción por los gases de la atmósfera. El sol está en el zenith.



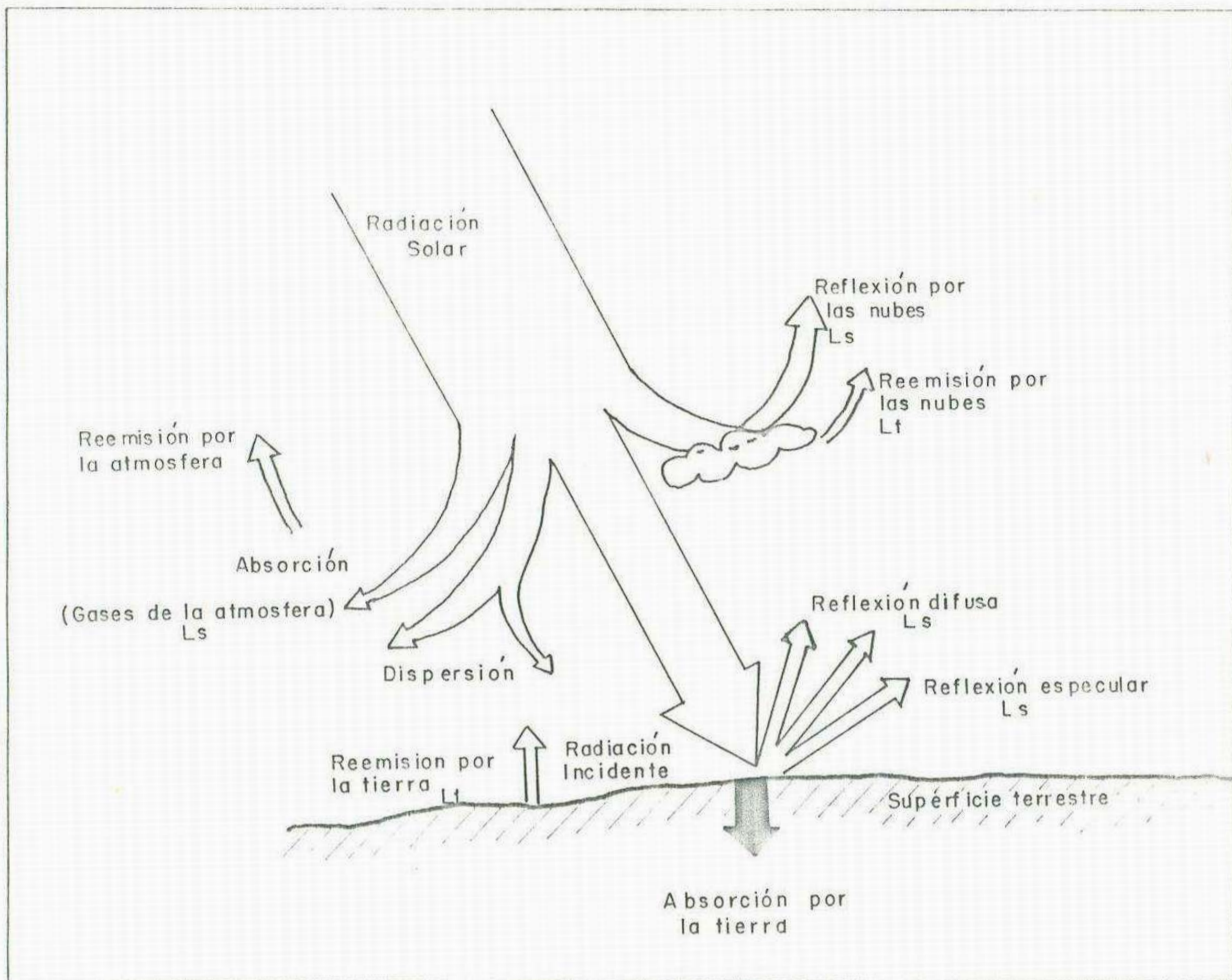
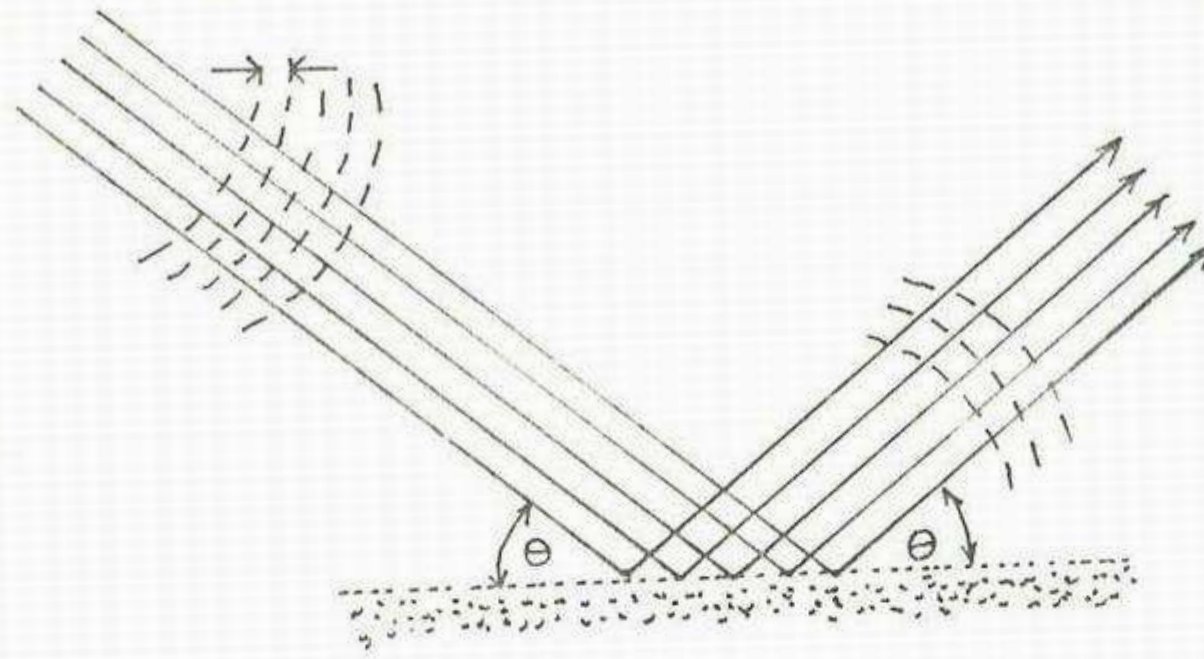


Figura 9 Transformaciones de la radiación electromagnética en su interacción con la atmósfera y con los cuerpos sólidos de la superficie terrestre

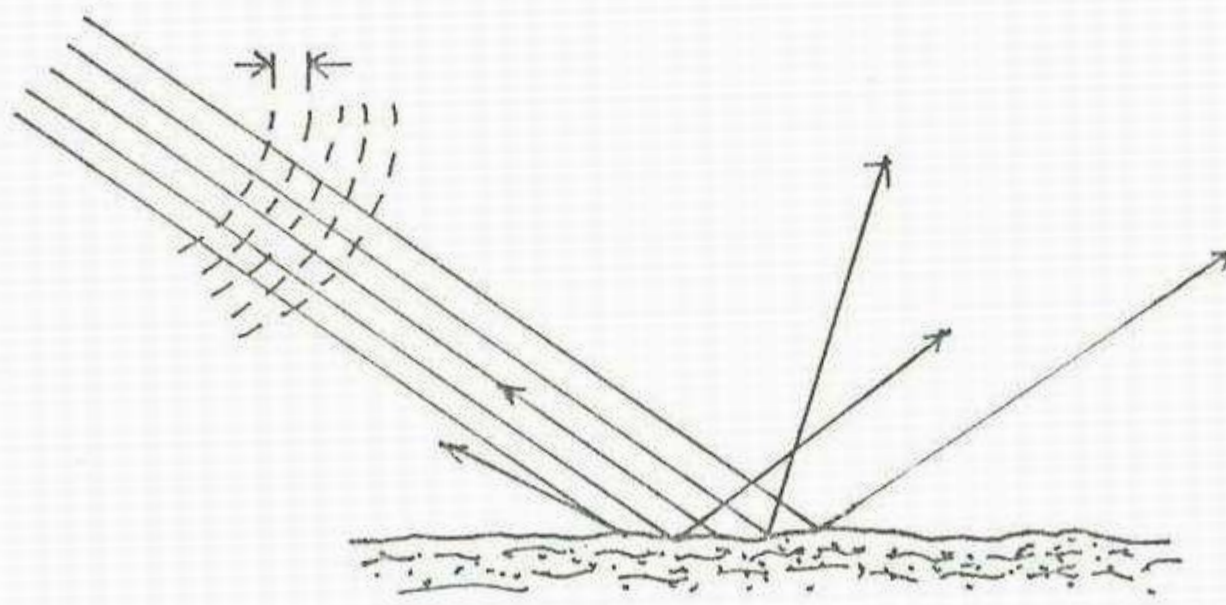
$L_s$  - Longitudes de onda de emisión solar  
 $L_t$  - Longitudes de onda térmicas.



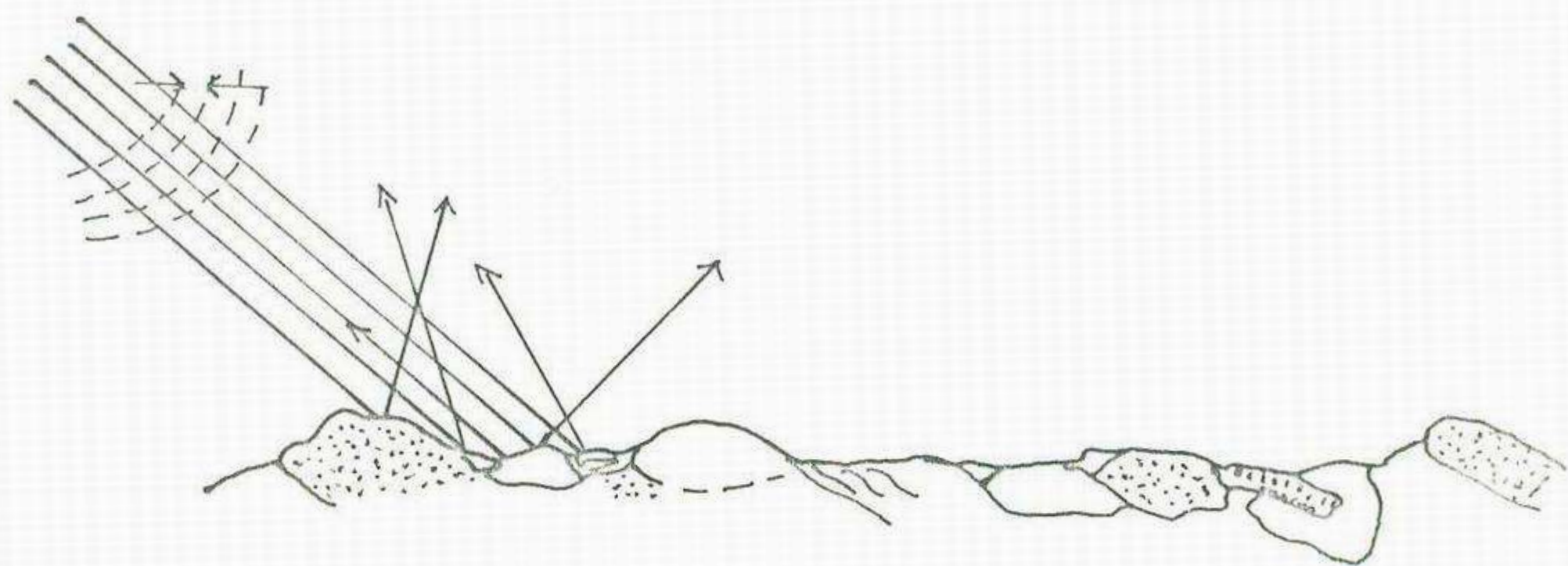
REFLEXION ESPECULAR (a) Y DIFUSA (b y c)



a - SUPERFICIE UNIFORME



b - SUPERFICIE IRREGULAR

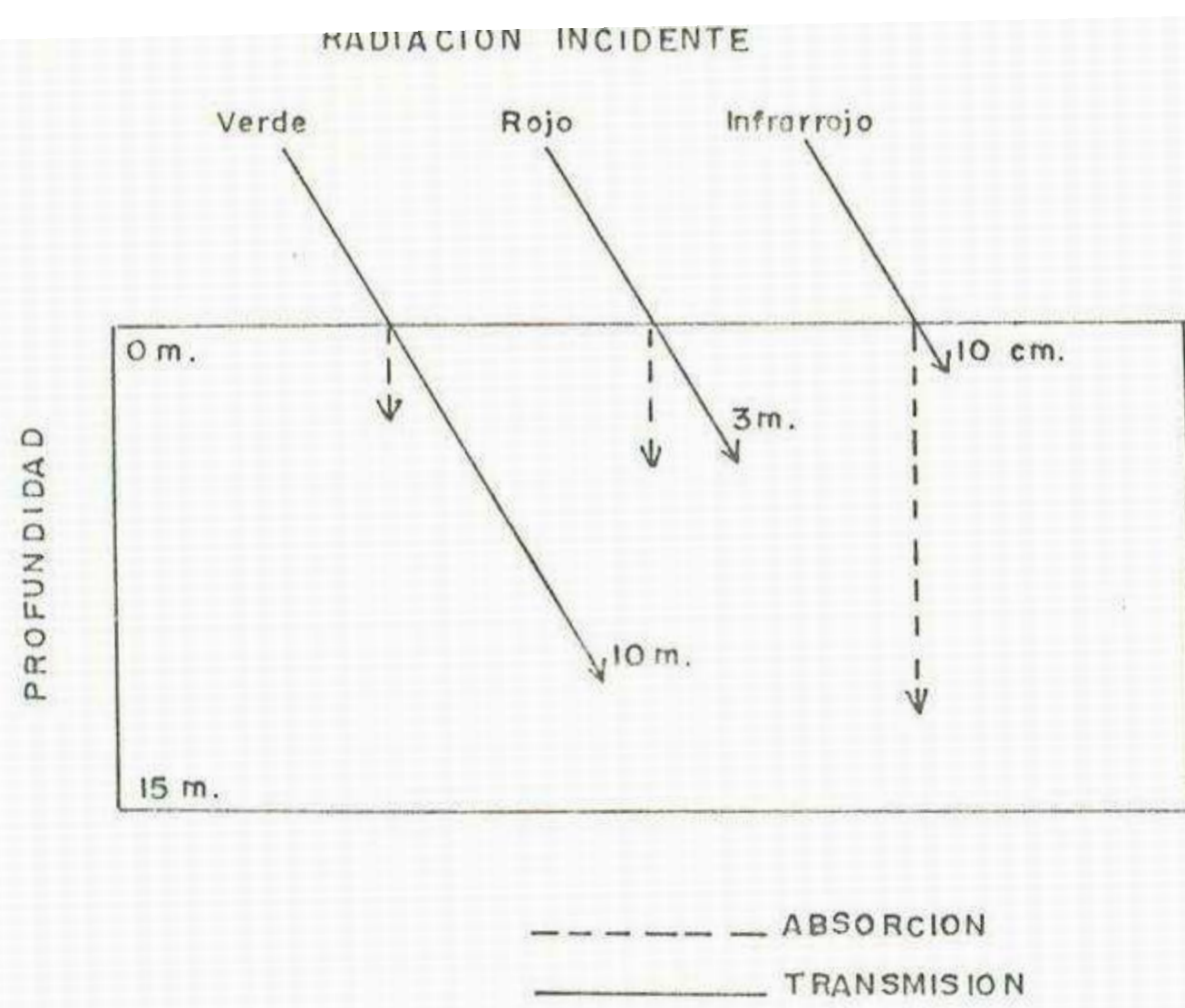


c - SUPERFICIE MUY IRREGULAR

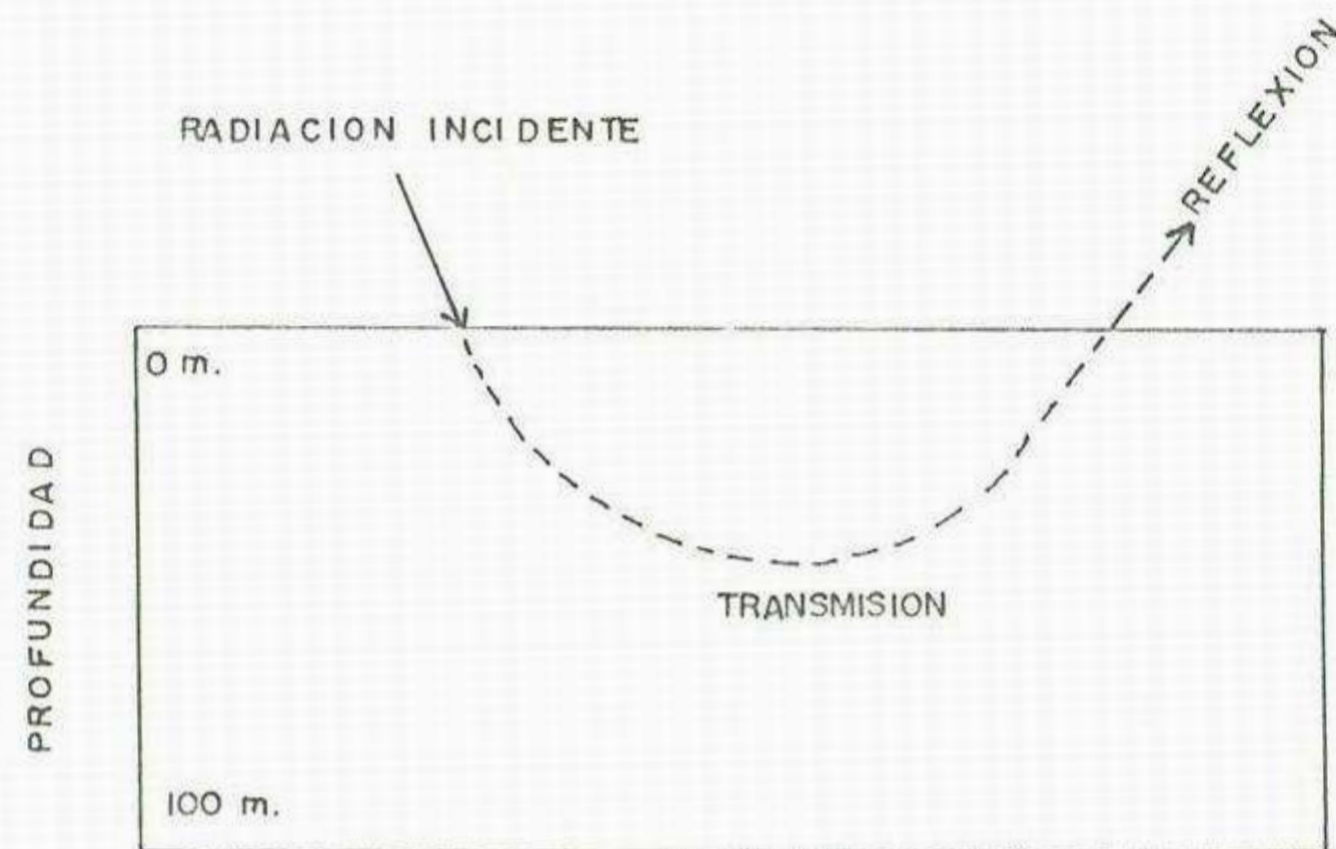
Figura .10



A - TRANSMISION  
AGUA CLARA



B - TRANSMISION  
AGUA TURBIA



C - TRANSMISION  
ABSORCION Y  
REFRACCION

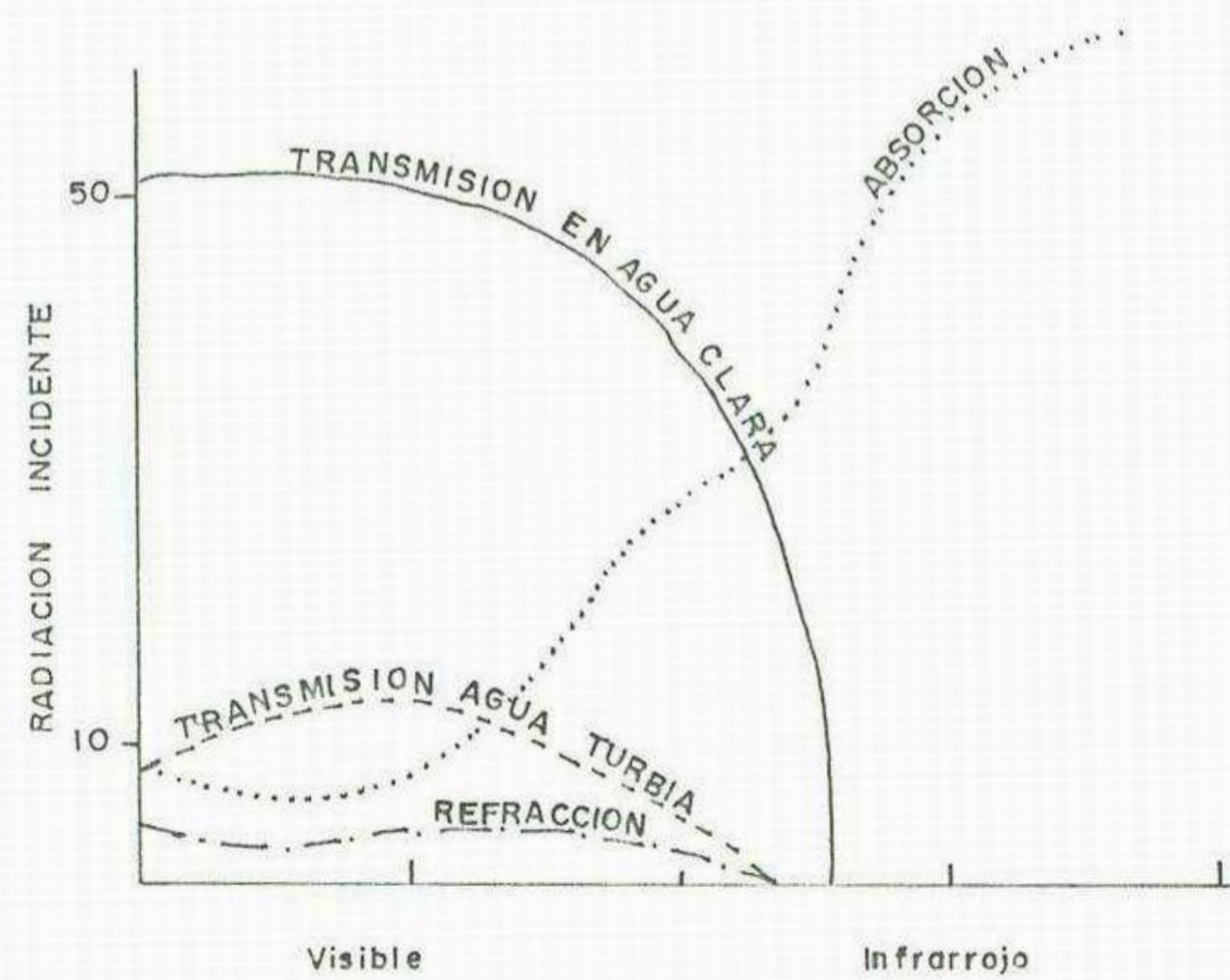


FIGURA 11 -

Transmisión absorción y reflexión de la radiación electromagnética en cuerpos de agua.



Las regiones de mínima absorción corresponden a la máxima transmisión; esto explica el color azul o verde de las grandes masas de agua limpia. La presencia de contaminantes reduce la transmisión para determinadas longitudes de onda, cuando se trata de contaminantes químicos que pueden disolverse completamente en el agua, los contaminantes que aportan partículas sólidas, incrementan la reflexión (fig. 11). Para radiaciones de longitud de onda superior a 10 micrómetros, la absorción va disminuyendo progresivamente.

#### - Reflexión.

La superficie de separación entre agua y aire se comporta como una superficie de reflexión especular.

En general, la presencia de partículas de sedimentos aumenta la cantidad de energía reflejada, el agua turbia refleja en mayor proporción, la radiación incidente (fig. 11).

La reflexión producida por el fondo de una masa líquida es de naturaleza difusa y depende de las características de la misma; en aguas someras y carentes de sedimentos, puede reflejarse un porcentaje significativo de la radiación incidente, esta reflexión corresponde a longitudes de onda del rango visible, ya que el infrarrojo se absorbe casi en su totalidad.

#### 1.8.3 Interacción entre la energía electromagnética y los materiales sólidos.

La interacción de las radiaciones electromagnéticas con los elementos que forman la superficie terrestre (rocas, suelo, vegetación, objetos hechos por el hombre, ... etc.), depende de su composición química, características físicas del material y de la configuración de su superficie.



Desde el punto de vista de percepción remota se producen dos tipos importantes de interacción entre la energía electromagnética y los materiales de la tierra, ellos son: Reflexión y absorción, a los cuales se puede agregar también la penetración con o sin reflexión desde superficies internas, la transmisión, la reducción de intensidad, la dispersión, etc.

- Reflexión.

La energía electromagnética incidente sobre la superficie de un objeto y que no lo penetra, es reflejada.

La reflexión de energía producida por un objeto puede ser Especular, Difusa o una combinación de ambas.

- Reflexión especular. Tiene lugar cuando la rugosidad del material es inferior a la longitud de onda de la radiación incidente. En la reflexión especular, la energía es reflejada formando un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia.

- Reflexión difusa. Cuando la rugosidad del material es aproximadamente del mismo orden o de mayor magnitud que la longitud de onda, la energía electromagnética es reflejada en forma difusa, es decir, el ángulo de reflexión es diferente del ángulo de incidencia.

La reflexión de la energía se produce en varias direcciones, dependiendo de la rugosidad de la superficie (altura, forma, inclinación, etc.), y de la longitud de onda de la energía electromagnética (fig. 10 ).

- Reflexión especular-difusa. En general, las características del terreno producen una combinación de las dos reflexiones anteriores, por lo que parte de la energía incidente



es reflejada en la misma dirección de incidencia (fig. 10 ).

La reflexión produce también un cambio entre la polarización de emisión y la de recepción. El radar controla la polarización de la onda emitida y la polarización de la radiación reflejada por el terreno, recibiendo la señal polarizada, bien sea horizontal o vertical.

La forma como los cuerpos naturales reflejan la radiación electromagnética constituye una de sus propiedades fundamentales en percepción remota. Las curvas representadas en la figura 12 dan una idea de cómo cada cuerpo presenta variaciones en cuanto al porcentaje de radiación que refleja, en diversos rangos de longitud de onda; aquellos rangos en los cuales las curvas presentan mayor separación, diferencias entre estos cuerpos, una de las ventajas principales de la información multispectral consiste en permitir al usuario trabajar en las regiones en las cuales los cuerpos naturales presentan las máximas diferencias

- Absorción.

Las cantidades relativas de energía electromagnética reflejada o absorbida por un material, dependen principalmente de su coeficiente o constante dieléctrica. El valor de este coeficiente es difícil de conocer con precisión para los materiales de la superficie terrestre, debido al gran número de elementos que los forman, cada uno con las propiedades físicas y químicas, diferentes. El factor que en mayor grado condicionan la constante dieléctrica, es el contenido de humedad.

El porcentaje de energía absorbida por cada uno de los materiales que se encuentran en la superficie terrestre, varía



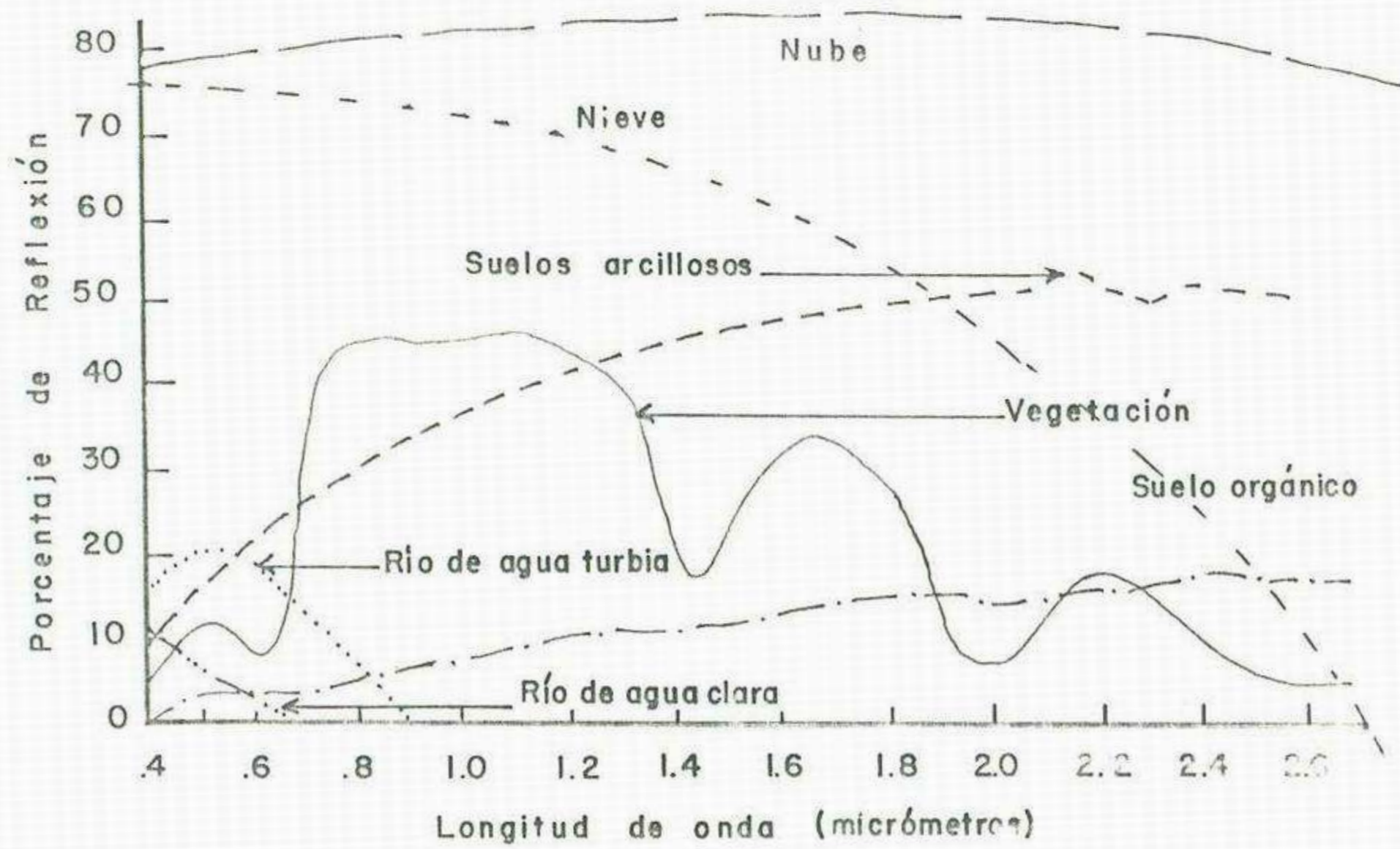


Figura 12 - Reflexión espectral de algunos tipos básicos de cobertura.



considerablemente de uno a otro cuerpo, por lo tanto, es necesario hacer la determinación en cada caso específico.

1.8.4 Interacción entre la energía electromagnética y la ionósfera.

Entre 80 y 100 km. de altura se extiende una zona ionizada de fuerte actividad electrónica. La fuerte ionización es producida por los rayos solares y aumenta considerablemente durante el día o en periodos de actividad solar.

La señal electromagnética que se propaga a través de la ionósfera, sufre un cierto número de perturbaciones producidas por la anisotropía y turbulencias del medio. Las principales degradaciones son:

- Refracción.

La onda que se propaga en la ionósfera sufre una refracción que es de signo contrario a la refracción que afecta a la misma onda en la atmósfera. En consecuencia el efecto combinado de ambas es relativamente reducido.

- Reducción de la velocidad de la onda.

La velocidad de propagación de la onda en la ionósfera es inferior a la velocidad de la luz.

Al utilizar la velocidad y tiempo de propagación para calcular una distancia, se cometen de acuerdo a lo anterior, dos errores al no tomar en consideración que:

- a) La velocidad de propagación en la ionósfera es inferior.
- b) La dirección de propagación es curva y no recta.

- Efecto Doppler.

Una señal radio eléctrica emitida por un vehículo en



movimiento es recibida por una estación fija, sufriendo un pequeño cambio de frecuencia debido al efecto Doppler.

Este fenómeno, también llamado "desplazamiento de frecuencia Doppler" es producido por el movimiento relativo entre la fuente de emisión y la de recepción. Se emplea en los sistemas de radar con apertura sintética y en sistema de navegación Doppler.

- Rotación del plano de polarización.

Cuando una onda electromagnética linealmente polarizada penetra en un medio ionizado, se separa en dos componentes. Para un cierto rango de longitudes de ondas, estos componentes se polarizan circularmente y al salir de la capa ionizada, se recomponen para formar nuevamente una onda linealmente polarizada cuyo plano de polarización ha sufrido un pequeño giro.

Este fenómeno se conoce también bajo el nombre de Efecto Faraday.

- Atenuación de la onda.

La atenuación de la onda que se propaga en la ionósfera es casi despreciable para longitudes de onda inferiores a 1 m. Para longitudes de onda mayores, la atenuación crece progresivamente.

- Fluctuaciones.

Las irregularidades en la distribución de la densidad electrónica causa fluctuaciones en la amplitud y frecuencia de las ondas. Este efecto es casi despreciable para longitudes de onda inferiores a 60 cm.

### 1.9 Detección, Transformación y Registro de la Energía



Recibida.

El flujo de información que llega hasta un sensor, debe ser en primer lugar detectado, luego transformado y registrado para su posterior análisis. El registro de la información puede realizarse de dos formas diferentes:

\_ Gráfico.

\_ Digital.

#### 1.9.1 Registro Gráfico.

El registro gráfico se lleva a cabo entre emulsiones fotosensibles o pantallas de televisión, donde se registra en tiempo real y en forma simultáneas la siguiente información:

a) La posición planimétrica, es decir, las coordenadas X e Y referidas a un sistema arbitrario de coordenadas por las deformaciones geométricas propias del sistema (cámaras aéreas convencionales, cámaras panorámicas, etc.).

b) La intensidad (tono) y banda espectral (color) de la energía recibida. por lo general, este tipo de registro es utilizado para longitudes de onda correspondientes al espectro visible y al infrarrojo cercano. Con esta información gráfica se facilita el análisis visual de la información recibida, aunque éste es precisamente el factor que retardará el proceso de interpretación de imágenes.

#### 1.9.2 Información Digital.

Para la mayoría de los sensores que trabajan fuera de la región visible del espectro, la aplicación directa del registro gráfico (tiempo real) resulta complicada, por lo cual se prefiere registrar inicialmente la información en forma digital para



producir posteriormente una imagen fotográfica.

La información recibida es cuantificada ( a veces también ampliada ) y registrada en cinta magnética ( o perforada ). Se registra de esta forma la información correspondiente a diversos parámetros de la energía recibida:

- a) Frecuencia (banda del espectro).
- b) Intensidad (transformada en voltaje).
- c) Polarización (H o V).
- d) Tiempo (registro, de retorno de las radiaciones, etc.)

El factor tiempo es para estos sensores de suma importancia, ya que en base al registro de tiempo se pueda:

- a) Relacionar la información digital con la información gráfica de la misma zona obtenida por otro medio.
- b) Relacionar la información multispectral (hasta 24 canales) correspondientes a un mismo punto del terreno.
- c) Determinar la posición planimétrica del punto cuya intensidad de radiación ha sido medida (radar).



La información digital correspondiente a una zona, puede ser fácilmente estudiada por medio de un computador, facilitándose la comparación de información correspondiente a diferentes bandas del espectro y su análisis estadístico (información multispectral).

Con los datos registrados digitalmente, también es posible reconstruir una imagen del terreno; utilizando el factor tiempo para la localización del punto en la imagen y la intensidad de energía, voltaje para producir la densidad (tono) del punto.

Para producir una imagen gráfica, a partir de datos digitales, es necesario transformar la información continua registrada digitalmente, en información gráfica discreta, lo cual produce siempre una pérdida de información, compresión de tonos en dicha imagen termal, radar, etc.).

#### 1.10 Resolución, detectabilidad y reconocimiento.

El término "resolución" ha sido tradicionalmente empleado como criterio único para medir la calidad de una imagen fotográfica, de televisión, radar, etc..

La resolución espacial o poder de resolución, es la habilidad de un sistema para distinguir o diferenciar dos objetos separados. También se define como el tamaño mínimo que debe tener un objeto o resgo para ser detectado por una imagen. Esta resolución varía en función de algunas características del objeto: forma, tamaño, contraste, etc..

Para sistemas de barridores es más usual utilizar el término "campo instantáneo de vista", el cual expresa la mínima porción del terreno que puede ser resuelta por el sistema. Igualmente es utilizado el término "célula de resolución" para



indicar el área mínima que puede ser captada por el sistema. Asociado a éste se encuentra el término "Pixel" o "Elemento pictórico, en el cual se conjuga el concepto de célula de resolución como unidad de área y el concepto de respuesta espectral de esa unidad en una determinada región del espectro.

Con la introducción de los sistemas modernos de percepción remota, en especial de las imágenes obtenidas desde el espacio extraterrestre utilizando barredoras multiespectrales, se han introducido nuevos conceptos sobre resolución.

- Resolución Espectral.

Es la capacidad de un sensor para captar diversas bandas o porciones del espectro electromagnético.

Esta capacidad está limitada por las zonas de absorción de la radiación electromagnética y por las características del sensor empleado. Los rangos de resolución espectral se establecen teniendo en cuenta fundamentalmente las aplicaciones que ha de tener la información obtenida.

- Resolución Temporal.

Es la capacidad de un sistema para producir imágenes de un mismo objeto en diversos lapsos de tiempo.

Con el desarrollo de las modernas técnicas de percepción remota, se han incorporado una serie de imágenes producidas con fines muy diversos y por equipos muy diferentes que obligan a tomar en cuenta una serie de factores como:

Altura del vehículo que transporta el sensor.

Tipo de sensor.





Area cubierta.

Precisión métrica de la imagen.

Banda espectral de la imagen.

Método para coleccionar y transmitir la información.

Con el objeto de ampliar y generalizar el concepto de resolución para todo tipo de sensor remoto, es conveniente definir los siguientes conceptos:

Sistema. Es la combinación de un instrumento de percepción remota y un observador o interprete.

Señal. Es el elemento de información (espectral o temporal) de una imagen.

Detectabilidad. Es la capacidad de un sistema de distinguir entre dos señales que están muy próximas en el espacio, tiempo o espectro.

Reconocimiento. Es la capacidad de un sistema para identificar una señal.

Una señal puede ser detectada a pesar de ser inferior al poder de resolución de un sistema (por ejemplo, un camino en imagen de radar), esto ocurre cuando se presenta un alto contraste entre el objeto y el medio que lo rodea.

Un objeto puede ser detectado y resuelto sin ser reconocido (por ejemplo, una imagen de la luna). Una señal puede ser detectada sin poder ser reconocida ni resuelta.

En los conceptos anteriores juega un papel muy importante el reconocimiento previo (nivel de referencia) que posea el observador sobre el objeto que pretenda localizar e identificar. Este factor ha sido decisivo para que hasta el momento no se haya encontrado una cifra numérica para expresar



la idea de detectabilidad y reconocimiento.

Asociada y dependiendo de los conceptos anteriores puede expresarse la idea de nitidez. Un sistema produce imágenes nítidas cuando éstas son limpias, claras y bien definidas.

## 2. CLASIFICACION DE LOS SENSORES REMOTOS.

### 2.1 INTRODUCCION.

Los sistemas de clasificación de los sensores remotos que se encuentran en la literatura disponible son realmente variados, y en ningún caso los criterios usados son excluyentes.

Esto significa que prácticamente cualquiera de los sensores estudiados, podrá ser incluido en todos los sistemas de clasificación.

Los criterios frecuentemente empleados para clasificar los sensores remotos son:

- a) Banda del espectro electromagnético utilizada.
- b) Fuente emisora.
- c) Ubicación espacial de la fuente emisora y receptora.
- d) Información registrada.
- e) Mecanismos utilizados para captar la información.

### 2.2 CLASIFICACION DE LOS SENSORES REMOTOS EN FUNCION DE LA BANDA ESPECTRAL.

- Sensores Ultravioleta (0.004-0.400 micrómetros).

El empleo de esta banda en percepción remota, especialmente en relacion a recursos naturales ha sido limitado, sin embargo, se han desarrollado varios sensores fotográficos y barridores



óptico mecánicos.

La banda del ultravioleta se divide generalmente en cuatro regiones, de las cuales solo las dos primeras son empleadas en percepción remota, pues las longitudes de onda de las otras dos, no atraviesan la atmósfera.

Se denomina ultravioleta fotográfico a la región comprendida entre 0.3 y 0.4 micrómetros, ya que esta región puede ser captada en emulsiones fotográficas.

	Cercano	0.400 - 0.315 micrómetros.
Ultravioleta	Medio	0.315 - 0.280
	Lejano	0.280 - 0.010
	Vacio.	0.010 - 0.004

- Sensores del Visible (0.400 - 0.700 micrómetros).  
Corresponde a la banda del espectro más utilizada en percepción remota, por ser la más conocida y estudiada. Se han desarrollado para esta banda un gran número de sensores: Cámaras fotográficas, sistemas de televisión, barredores óptico-mecánicos, etc..

- Sensores del Infrarrojo (0.700 - 14.0 micrómetros). Es la banda del espectro comprendida entre la región de las microondas y la banda visible.

Su longitud de onda se extiende de 0.70 micrómetros hasta 1 mm, y en general se divide en tres bandas:

	Cercano	0.7 - 1.3 micrómetros.
Infrarrojo	Medio	1.3 - 3.0
	Lejano	3.0 - 14.0

Basandose en la propiedad de la banda infrarroja lejana (y de microondas) de que la emisión de energía puede ser detectada en forma de calor, se han desarrollado varios



radiómetros para esta banda.

La presencia de nubes, lluvia y nieve afectan la percepción, por lo que se exigen condiciones atmosféricas muy especiales. La utilización del infrarrojo se limita a las ventanas atmosféricas que se presentan en esta región del espectro.

Sensores de frecuencias extremadamente altas (EHF 30 - 300 GHz (0.1 - 1 cms)). La banda corresponde a una transición entre microondas y radiación infrarroja.

La utilidad de esta banda está limitada por la absorción del vapor de agua y el oxígeno; sin embargo, se han desarrollado algunos sistemas de radar y radiómetros que emplean frecuencias correspondientes a esta región.

- Sensores de Microondas (0.3 - 300 cms). Los instrumentos y equipos de percepción remota disponibles para esta banda de frecuencia super alta son numerosos y muy avanzados.

Se incluyen en este grupo los diversos equipos de radar (para detección de objetos o formación de imágenes) radiómetros y espectrómetros.

Por encima de los 13 GHz, la señal electromagnética es fuertemente atenuada por efecto de la absorción y dispersión producida por el vapor de agua, el oxígeno y la lluvia.

Es necesario utilizar las ventanas de transmisión disponibles para 35, 90, 140 y 225 GHz.

- Sensores de Frecuencia Ultra Alta (UHF 300 MHz. - 33 GHz.). La lluvia y vapor de agua de la atmósfera afectan muy poco esta banda, lo cual hace que los sensores de este grupo



(radiómetros) sean casi independientes de las condiciones atmosféricas y además pueden ser utilizados tanto durante el día como por la noche.

- Sensores de Frecuencias Muy Altas (VHF 30 - 300 MHz.). La banda de frecuencias altas ha sido muy utilizada en percepción remota (por ejemplo, medición de espesor de capas de hielo), debido a que requiere una antena pequeña, fácil de transportar en cualquier avión o vehículo espacial.

- Sensores de Frecuencias bajas, medias y altas (LF, MF, HF 30 KHz - 30 MHz.). Su uso ha sido tradicionalmente en el campo de las comunicaciones y a pesar de ser muy bien conocidas sus propiedades de propagación, su empleo en percepción remota de recursos naturales ha sido muy limitado.

### 2.3 CLASIFICACION DE SENSORES EN FUNCION DE LA FUENTE EMISORA.

El criterio se basa en establecer si la fuente emisora de energía pertenece al sistema de percepción remota o si es independiente.

Así los sensores se clasifican en dos grupos:

- Sensores Pasivos. Son aquellos que reciben la energía emitida por otra fuente (generalmente el sol) y reflejada por los objetos (fotografía, barridores multiespectrales, etc.).

- Sensores Activos. Son aquellos que poseen la fuente de energía, de manera que emiten la energía electromagnética en dirección al objeto y luego detectan la energía reflejada (radar).



#### 2.4 CLASIFICACION DE SENSORES REMOTOS EN FUNCION DE LA UBICACION ESPACIAL DE LA FUENTE EMISORA Y RECEPTORA.

La clasificación se basa en la posición relativa de la fuente emisora de energía y la fuente de recepción de la misma.

Se distinguen dos grupos de sensores:

- Sensores monoestáticos. Cuando las fuentes de emisión y recepción de energía ocupan la misma posición en el espacio, es decir que emite y recibe la energía desde la misma posición (radar).

- Sensores bi-estáticos. La fuente de emisión tiene una posición espacial diferente de la fuente de recepción (fotografía aérea, barredores multiespectrales, etc.).

#### 2.5 CLASIFICACION DE SENSORES REMOTOS EN BASE A LA INFORMACION REGISTRADA.

De acuerdo a la información registrada, los sensores se clasifican en:

- Sensores fotográficos. Cuando la información es registrada en emulsión fotográfica en el momento de ser recibida (cámaras aéreas, cámaras multiespectrales, etc.).

- Sensores no fotográficos. La información recibida es proyectada sobre una pantalla o es registrada en forma gráfica (perfiles) o en forma digital (cinta magnética).

Los sensores que registran la información digitalmente presentan la ventaja de poder detectar la energía correspondiente a una banda muy angosta del espectro.



Así, los sensores que registran la información digitalmente pueden ser divididos en:

- Radiómetros. Cuando se registra la intensidad de una determinada longitud de onda del espectro (en la práctica es una banda muy angosta).

- Espectrómetros. Si registran la intensidad de una banda amplia del espectro.

## 2.6 CLASIFICACION DE LOS SENSORES REMOTOS SEGUN LOS MECANISMOS UTILIZADOS PARA CAPTAR LA INFORMACION.

EN un sentido muy amplio y según los mecanismos para captar la información, los sensores pueden clasificarse en:

- Sensores fotográficos.
- Sensores electro-ópticos formadores de imagen.
- Sensores electro-ópticos no formadores de imagen.
- Sensores de microondas.

Los sensores fotográficos incluyen todos los tipos de cámaras, operan todos bajo el mismo principio.

Sensores electro-ópticos formadores de imagen. En un sentido muy general y con base en los sistemas utilizados para captar la información, se puede clasificar los sensores en tres categorías:

- a) De formato o cuadro.
- b) Barridores no oscilantes o de arreglo lineal.
- c) Barridores mecánicos.

Los sensores de formato o cuadro son auto-suficientes, ya que no necesitan movimiento de barrido para captar imágenes de una área. Los primeros sensores de este tipo fueron los sistemas de televisión, a partir de los cuales se desarrollaron los



sensores de vidición. Un sistema de este tipo fue usado en los programas Landsat 1, 2 y 3 (RBV).

Los barredores no oscilantes, barren en una dirección por medio de lecturas electrónicas y requieren de un sistema auxiliar de movimiento o inclinación para barrer en el otro sentido. Sistemas como este, se usan en el programa SPOT.

Los barredores mecánicos incluyen una amplia variedad de sistemas de barrido doble o sencillo, barren de derecha a izquierda y requieren de una fuente externa para desplazarse en otro sentido, normalmente, esta última forma de movimiento lo proporciona la plataforma portadora.

Los barredores mecánicos han sido ampliamente utilizados en estudios de recursos naturales transportados por plataformas tanto aéreas como espaciales. Este sistema está siendo usado en el programa Landsat.

En la misma forma los barredores estáticos requieren del desplazamiento de la plataforma para lograr la captación de información sobre áreas relativamente grandes.

Sensores electro-ópticos no formadores de imagen. Este tipo de sensores se caracteriza porque no forman una imagen a partir de la información captada, sino que producen curvas, grupos de números o números simples, que caracterizan la energía electromagnética emitida desde, reflejada por, y/o transmitida a través de una superficie o región del espacio.

La aplicación fundamental de estos sensores es la medición de cantidades ópticas tales como flujo radiante, densidad de flujo radiante, radiancia, las cuales describen la intensidad del



campo de radiación o las propiedades ópticas de una superficie o región del espectro electromagnético.

Los instrumentos sensores de este grupo son:

- a) de banda amplia infrarrojo.
- b) de banda amplia visible/infrarrojo cercano.
- c) de radiación solar directa.
- d) termómetro de radiación.
- e) radiómetro multibanda.
- f) espectroradiómetro.

Sensores de microondas. Según su sistema de operación pueden ser sistemas activos o pasivos.

Los sistemas activos formadores de imagen son los radares de visión lateral SLAR, los cuales operan según dos sistemas.

Apertura (o antena) real.

Apertura (o antena) sintética SAR.

Los sistemas de microondas no formadores de imágenes pueden clasificarse en:

Dispersómetros.

Radiómetros de microondas.

Los radiómetros, a diferencia del SLAR son sistemas pasivos.

Los dispersómetros son instrumentos diseñados para medir la dispersión o propiedades reflectivas de las superficies. un radar dispersómetro mide la reflexión y dispersión de las ondas generadas por el radar mismo.

Los radiómetros de microondas se aplican en la medición de la intensidad de la radiación en la región de las microondas, los sistemas transportados por satélites se aplican preferencialmente



a meteorología y oceanografía por su baja resolución espacial.

### 3.- PLATAFORMAS UTILIZADAS EN PERCEPCION REMOTA.

La evolución de los sistemas de teledetección ha estado estrechamente ligada a la tecnificación de los medios portadores de los sistemas sensores.

En percepción remota se considera una plataforma, a cualquier sistema o vehículo capaz de transportar un sensor remoto a la zona de operación y mantenerlo sobre el objetivo durante el tiempo que sea necesario.

Las plataformas se caracterizan fundamentalmente, por la altitud a la cual permiten la observación de la tierra. Con la tecnología actual, es posible obtener información desde unos pocos metros sobre la superficie (con plataformas colocadas sobre camiones o estáticas), hasta cientos de kilómetros 200 a 1000 kilómetros de altitud con satélites de órbitas polares y ecuatoriales, en algunos casos hasta miles de kilómetros como lo son las órbitas geosincrónicas 35 000 kms. (ver fig. 13 ).

Al introducirse la percepción remota desde el espacio extraterrestre, el concepto de plataforma se ha ampliado, ya que es necesario considerar todo el sistema, compuesto no solo por la nave portadora sino también por el complejo de comunicaciones y el control en la tierra.

Las plataformas utilizadas en percepción remota cubren una amplia gama de sistemas:

- Cestas colocadas a pocos metros de altura sobre el terreno.



- Globos.
- Aviones y helicópteros.
- Cohetes.
- Satélites.

Según el medio en el cual cumplen sus funciones, se pueden dividir las plataformas en dos tipos:

- a) Plataformas aéreas.
- b) Plataformas espaciales.

Las plataformas aéreas son sistemas capacitados para operar solo dentro de la atmósfera terrestre, mientras que las plataformas espaciales tienen capacidad para operar en el espacio extraterrestre.

### 3.1 ORBITAS.

Los satélites actualmente en uso para recursos naturales, operan desde órbitas heliosincrónicas y de sincronización terrestre o geosincrónicas; según el astro que se tome como referencia para la sincronización de la trayectoria de la nave. Las órbitas heliosincrónicas, normalmente son de menor altitud por lo cual se utilizan preferencialmente para transportar sistemas formadores de imágenes; según su posición con relación a la superficie de la tierra las órbitas pueden ser polares, ecuatoriales o libres. ( Fig. 13 ).

Las órbitas polares han sido ampliamente utilizadas en teledetección, en este caso, el satélite orbita pasando por los polos, a cada paso, la tierra se ha desplazado un determinado número de kilómetros, por tanto, debe de haber un balance entre el área cubierta en cada paso del satélite y el desplazamiento de



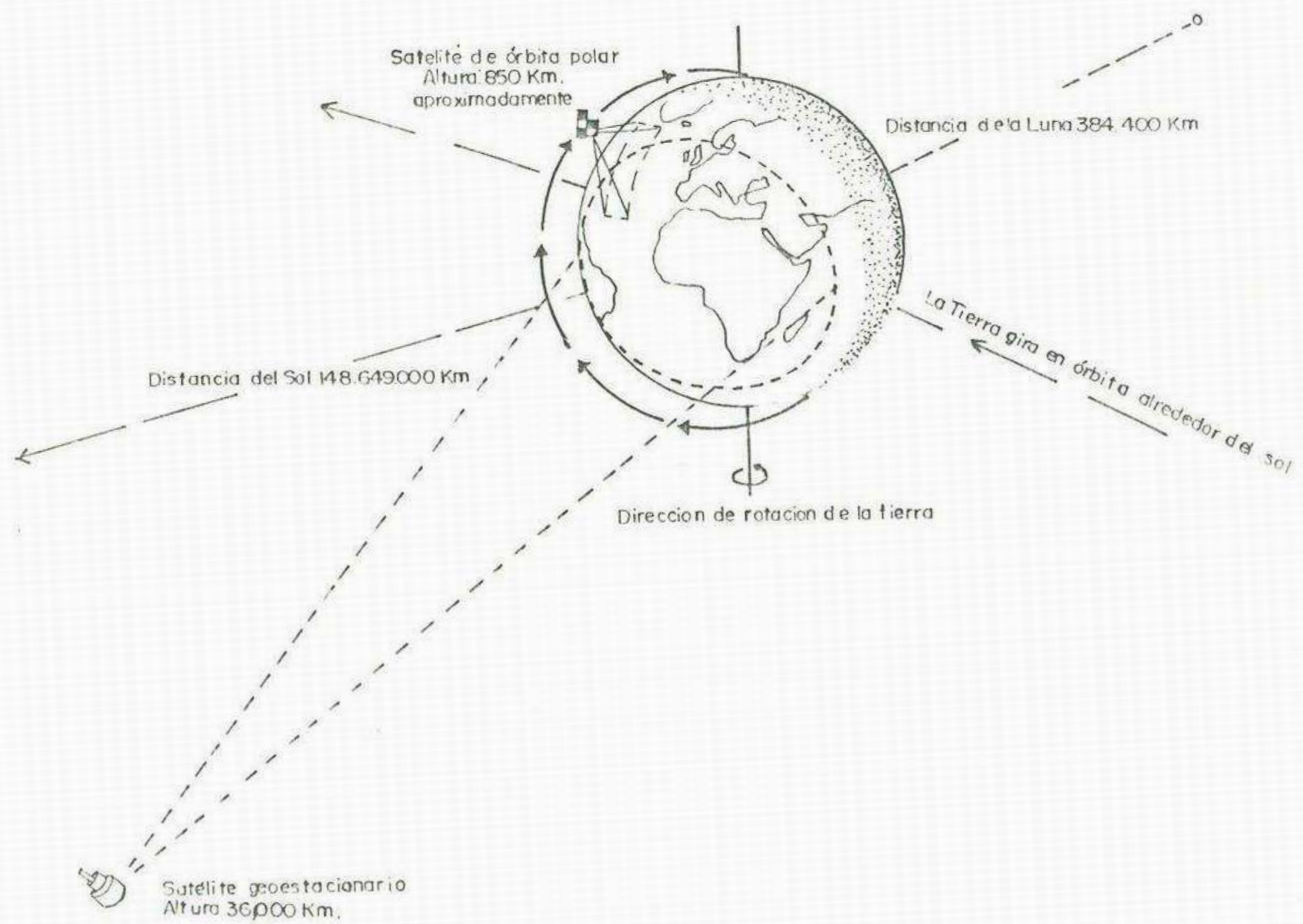


Figura 13 - Ilustración esquemática que muestra el campo de visión de la tierra desde un satélite de órbita polar y desde un satélite geoestacionario.



la tierra en su rotación sobre su propio eje para lograr un cubrimiento total según el programa, este cubrimiento se logra después de un lapso de varios días, así por ejemplo, Landsat lo obtiene en un periodo de 16 días. Las plataformas utilizadas para estudios de los recursos naturales, operan en órbitas del orden de 200 a 1000 Kmts. de altitud, según los objetivos de la misión, tipos de sensores transportados y la resolución espacial requerida.

Las órbitas ecuatoriales han sido más empleadas en programas específicos, tal es el caso del programa para la observación oceanográfica (como el Seasat), utilizan órbitas casi ecuatoriales.

En comunicaciones tienen especial aplicación las plataformas "estacionarias", éstas utilizan la órbita geostacionaria. Esta órbita presenta características muy especiales, ya que cuando se coloca el satélite a la altura adecuada, 35786.103 Kmts. este gira a una velocidad angular igual a la velocidad de rotación de la tierra, por tanto el satélite siempre observa un determinado sector de la superficie terrestre, además por la gran distancia entre la tierra y el satélite, es posible observar una zona sumamente amplia con cada plataforma. ( Fig. 13 ).

Las órbitas heliosincrónicas, operan en diferentes periodos del día, para lograr una máxima iluminación, se programan órbitas de medio día ; si se requiere acentuar las sombras para mejorar la apreciación del relieve, se utilizan órbitas de media mañana (ejemplo Landsat) y para sensores térmicos se usan generalmente órbitas previas al amanecer.



#### 4.- RELACION DE LA RADIACION ELECTROMAGNETICA CON ALGUNOS CUERPOS NATURALES.

##### 4.1 Emisión de la Radiación Electromagnética.

Los sistemas de sensores operacionales en la actualidad, pueden captar radiación proveniente de los objetos, como energía emitida o reflejada.

Existe una relación directa entre la emisión de energía y la temperatura de los cuerpos; como principio general, los picos máximos de emisión de la radiación electromagnética se desplazan en sentido inverso a los incrementos en longitud de onda, al aumentar la temperatura.

Así (fig. 14) un cuerpo negro a 27 C (300 K) presenta su máxima emisión, en longitudes de onda del orden de los 10 micrómetros. Al elevar la temperatura a 327 C (600 K) la máxima emisión corresponde a longitudes de aproximadamente 5 micrómetros, para temperaturas de 927 C (1200 K) las longitudes de onda correspondientes a la máxima emisión, fluctúan entre 2 y 3 micrómetros.

Para curvas de emisión similares a la curva de la energía solar (cuerpo negro a 5800 K) las longitudes de onda de la energía emitida corresponden al rango visible del espectro electromagnético; la máxima emisión corresponde a las longitudes de onda del orden de 0.5 micrómetros y se denomina "pico" de emisión solar, su equivalente en la misma posición es el pico de reflexión terrestre.

Al punto de máxima emisión, para los cuerpos a temperaturas normales en la superficie terrestre (27 C), se denomina "pico



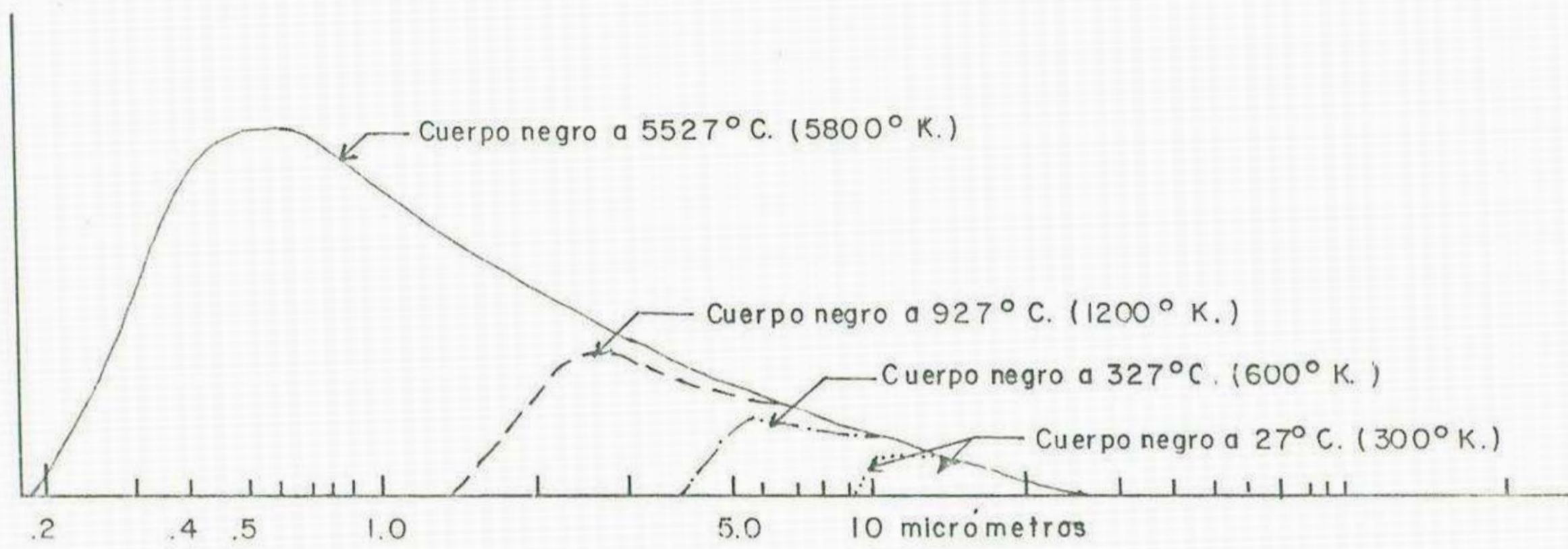


FIGURA 14- Emisión de la radiación electromagnética por cuerpos negros a diferentes temperaturas.



de emisión terrestre" y se presenta en longitudes de onda de 9.7 micrómetros. Así para los cuerpos terrestres, las máximas de emisión y de reflexión corresponden a las longitudes de onda de 9.7 y 0.5 micrómetros, respectivamente.

Los sensores diseñados para captar información sobre los cuerpos de la superficie terrestre, se calibran para captar bien sea energía reflejada, aprovechando la región próxima al pico de reflexión terrestre, o bien energía emitida, aprovechando la zona próxima al "pico" de máxima emisión; este es el motivo por el cual los sensores térmicos, operan en longitudes de onda que normalmente fluctúan entre 8 y 13 micrómetros.

La principal ventaja de los sensores térmicos, es no depender de las condiciones atmosféricas para la obtención de datos; no obstante, su operación durante el día, se ve afectada por las fluctuaciones que pueden hacer que un mismo cuerpo varíen considerablemente su temperatura en lapsos de tiempo relativamente cortos (Ejemplo, entre las 10 a.m. y 3 p.m., en verano), en general se prefiere operar estos sensores durante la noche cuando las temperaturas son más estables.

#### 4.2 Reflexión de la Radiación Electromagnética.

La radiación que incide sobre un cuerpo natural en la superficie terrestre, puede ser absorbida, transmitida o reflejada.

La proporción de energía que es absorbida no puede ser captada por ningún sensor remoto; por lo cual, se considera energía perdida. La transmisión tiene lugar solo en cuerpos relativamente transparentes, (Ejemplo, cuerpos de agua) por lo



cual esta parte de la radiación es utilizable solo en casos especiales.

Por tanto, en una alta proporción de los casos, los sensores remotos, dependen para su operación de la energía reflejada.

Las características más estrechamente relacionadas con la proporción de energía que reflejan los cuerpos naturales son: irregularidades de la superficie, contenido de humedad, color de la superficie, composición química.

Las irregularidades de la superficie condicionan en una alta proporción la reflexión de los cuerpos naturales; como principio general puede establecerse que cuando éstas son de magnitud menor que la longitud de onda, se presenta reflexión especular: el ángulo de reflexión de la radiación es igual al ángulo de incidencia; para irregularidades mayores que la longitud de onda, se presenta reflexión difusa. En la reflexión especular, normalmente casi la totalidad de la radiación es reflejada en determinada dirección; por tanto, puede bien llegar al sensor produciendo una señal sumamente fuerte como sucede generalmente en la fotografía y los barredores, o bien desviarse completamente de la trayectoria del sensor y no producir ninguna señal como sucede con el radar de visión lateral.

Las características de reflectancia, están íntimamente asociadas a la composición misma de los cuerpos naturales, tanto las propiedades químicas como las físicas inciden en estas características. La fig. 15 muestra la diferencia en reflectancia para 5 cuerpos naturales; es especialmente interesante, observar la región comprendida entre 0.4 y 0.8



# Reflexión Espectral de Tipos Básicos de Cobertura

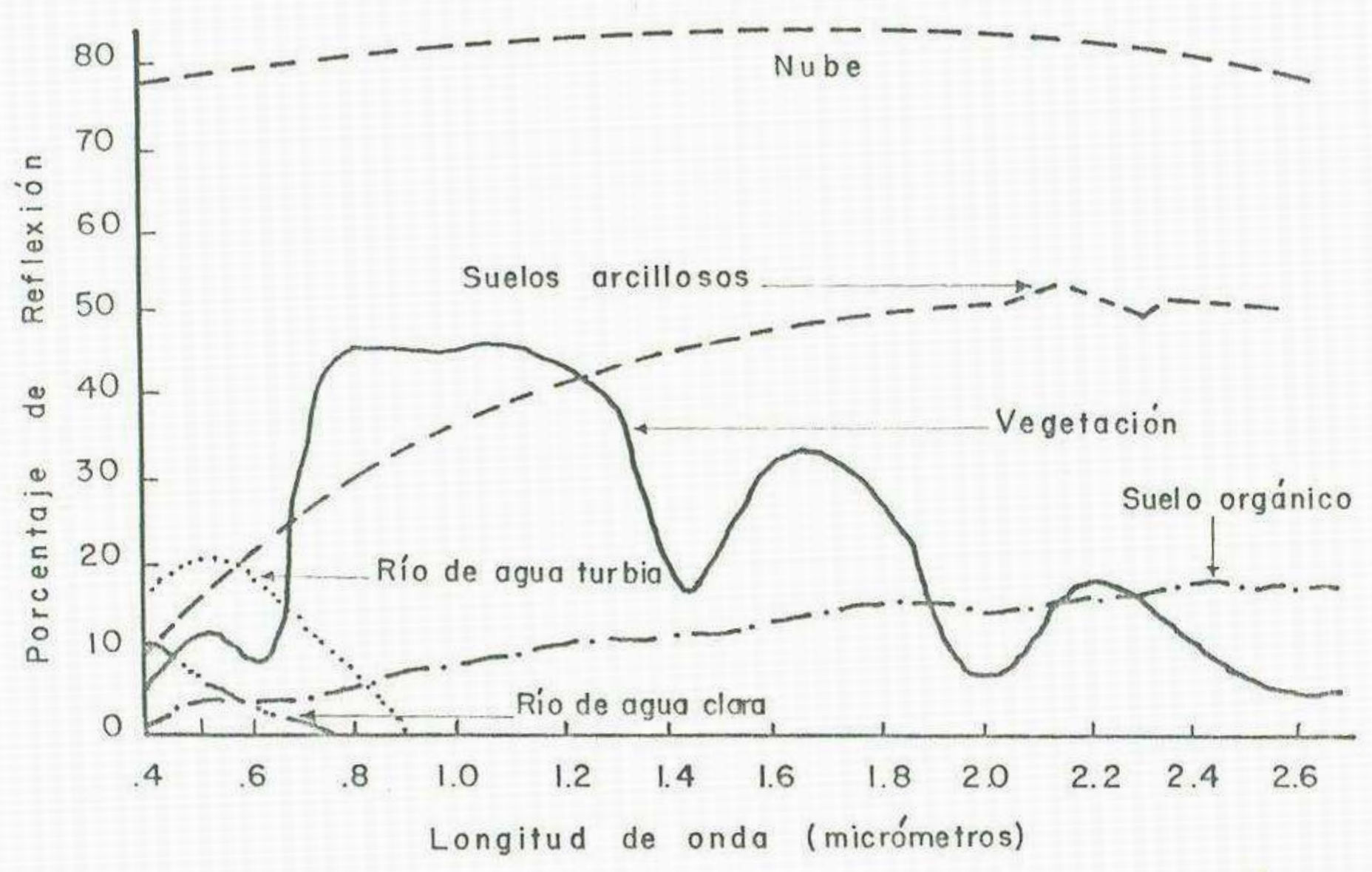


FIGURA 15 - Reflectancia espectral de algunos cuerpos naturales.



micrómetros, las curvas de suelo arcilloso, suelo orgánico y vegetación presentan notoria tendencia ascendente, mientras que el agua tanto clara como contaminada presenta tendencia descendente.

En la región 0.7 a 0.9 micrómetros se muestra una marcada separación entre las curvas de vegetación, agua, suelo; por tanto, puede tomarse esta región como básica, si se quiere establecer la separación entre estos tres cuerpos naturales; no obstante, si se quiere diferenciar aguas claras de aguas turbias, el mejor punto sería del orden de 0.5 micrómetros, donde las curvas están más separadas. Es claro que la diferenciación de los materiales con base en sus características espectrales, requiere de un cuidadoso estudio.

Al analizar imágenes multiespectrales, es especialmente importante utilizar las curvas de reflectancia y tener en cuenta las propiedades de los diversos cuerpos, especialmente aquellas que pueden variar en lapsos de tiempo relativamente cortos (Ejemplo: contenido de humedad).

#### 4.2.1 Reflectancia en los Materiales Geológicos.

La composición de las rocas por su complejidad, hace que sus características de reflectancia sean a su vez también complejas. La mayoría de las investigaciones se han enfocado al aspecto de las propiedades espectrales de los minerales, pero los resultados de estas investigaciones no satisfacen plenamente las necesidades de los interpretes, ya que en la naturaleza, los minerales solo excepcionalmente se presentan como materiales puros, su ocurrencia es como mezclas que conforman las rocas; un factor que



incrementa la dificultad en la identificación basada en las propiedades espectrales es el grado de alteración, una roca meteorizada presenta propiedades espectrales totalmente diferente a las que presenta en estado de no alteración. También ocurren los minerales en forma granular en las arenas y en los suelos, esto implica una dificultad adicional, ya que las características espectrales de estos cuerpos, son altamente dependientes del contenido de humedad y de la alteración que hayan sufrido (oxidación, reducción, etc.,). No obstante las dificultades presentadas, el conocimiento de las propiedades de reflectancia de los minerales, asociado al conocimiento de la composición de las rocas, pueden dar al interprete una buena base para identificar al menos grupos o tipos de roca en las imágenes de percepción remota.

Según su ocurrencia en la corteza terrestre, los elementos pueden describirse, así:

Oxígeno	(60 %)
Silicio	(20.4 %)
Aluminio	(06.2 %)
Hidrógeno	(02.8 %)
Sodio	(02.5 %)
Calcio	(01.9 %)
Hierro	(01.9 %)
Magnesio	(01.8 %)
Potasio	(01.4 %)
Titanio	(00.2 %)



La clasificación de los minerales se basa en la composición química, física y estructura cristalina. Las principales divisiones son las clases químicas basadas en los no metales o aniones presentes. Las clases más importantes son: sulfuros, óxidos, haluros, carbonatos, boratos, silicatos, etc..

Los silicatos son particularmente importantes ya que contienen un cuarto de todas las especies minerales, cerca de 70 de ellos constituyen el 90 % de la corteza terrestre.

El factor complicación es la impureza, ya que los minerales no ocurren en formas puras. Al cristalizar los minerales atrapan entre sus estructuras trozos de elementos o moléculas y estas impurezas pueden tener un gran efecto sobre el comportamiento del mineral, el cual puede ser muy notorio en el espectro visible. Así la calcita puede aparecer casi de cualquier color al examinarla visualmente, dependiendo del tipo y localización de las impurezas en la estructura. Por esto el color es generalmente un indicador muy pobre de la composición mineral; sin embargo, en condiciones especiales puede considerarse un diagnóstico útil.

Propiedades espectrales de los silicatos, los principales aspectos acerca de este tema, pueden sintetizarse así:

1.- Para todos los minerales de silicatos, la reflectancia aumenta a todas las longitudes de onda, cuando el tamaño de las partículas decrece.

2.- En la mayoría de los casos, los rasgos espectrales prominentes se tornan más evidentes cuando aumenta el tamaño de las partículas.



3.- Una alta mayoría (aproximadamente 75%), muestran claramente la firma de los hidróxidos a 1,4 micrómetros. Este rasgo está enteramente ausente de los demás especímenes, con muy pocas excepciones como algunos piroxenos.

4.- Muestras de minerales muy puros sin inclusión de fluidos tienen espectro carente de rasgos, con reflectancia casi constante a través del espectro visible e infrarrojo. El cuarzo puro es el ejemplo típico de este tipo de minerales sin espectro característico.

5.- Cuando se presenta absorción de hierro ferroso, normalmente aparece con un mínimo de reflectancia en la región de 1,0 a 1,1 micrómetros. Cuando ocurren bandas de hierro en la región 1,8 a 1,9 micrómetros se distinguen de las bandas de agua que también ocurren a estas longitudes de onda, porque las amplitudes de sus líneas son mucho mayores que aquellas de la banda de absorción de agua.

6.- Las transiciones debidas a hierro férrico aparecen como una banda amplia de mínima reflectancia en el espectro visible. Las figs. 16 y 17 muestran las curvas de reflectancia para algunas rocas comunes.

#### Carbonatos.

La calcita es uno de los minerales más comunes en la tierra; ocurre con gran frecuencia en masas de rocas sedimentarias, en las cuales puede ser el mineral predominante y aún el único.

El mármol, la caliza son de común ocurrencia. También ocurre con mucha frecuencia la calcita en vetas y vetillas de



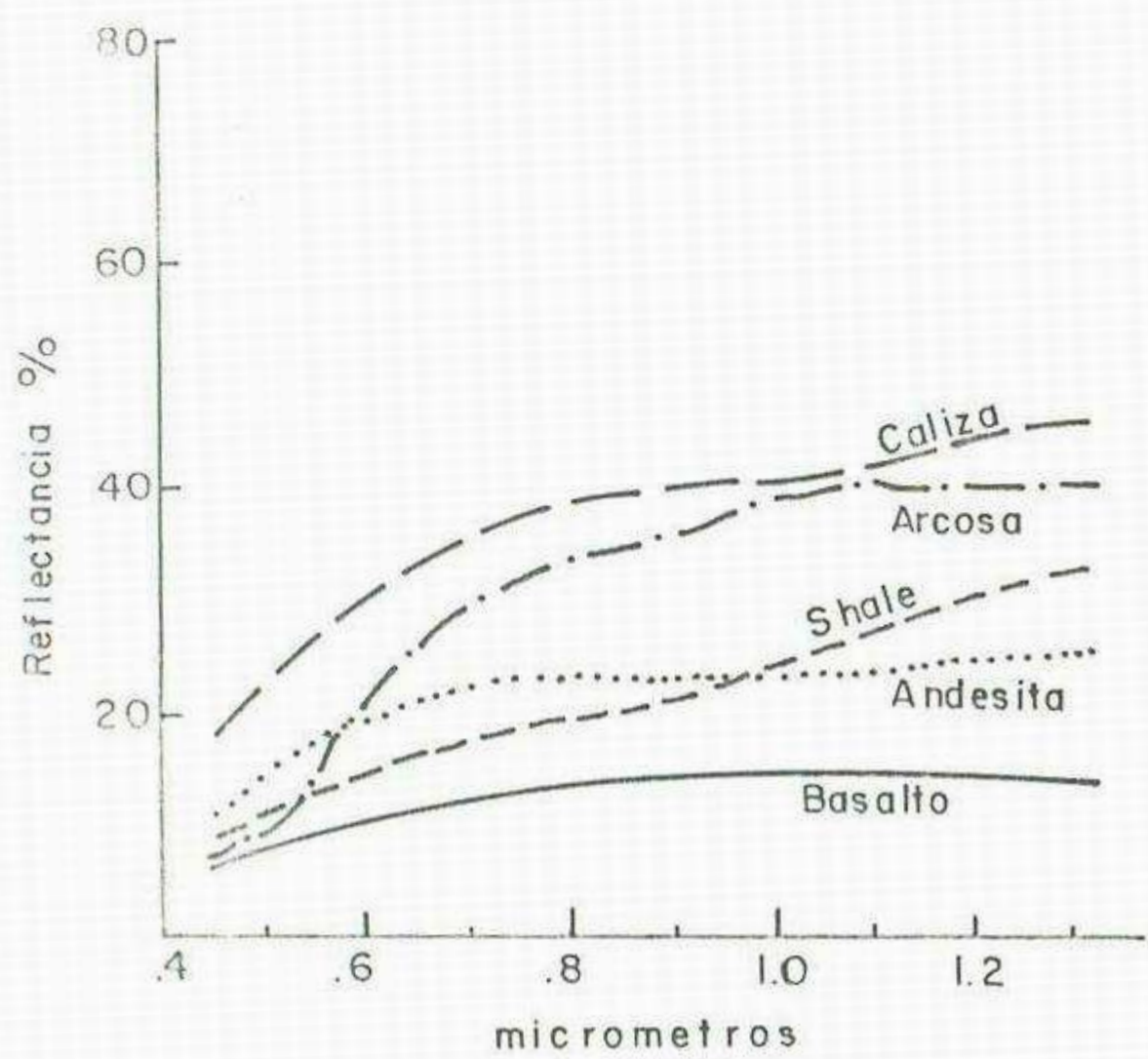


FIGURA 16 - Reflectancia espectral de rocas volcánicas y sedimentarias. (medida en el campo)

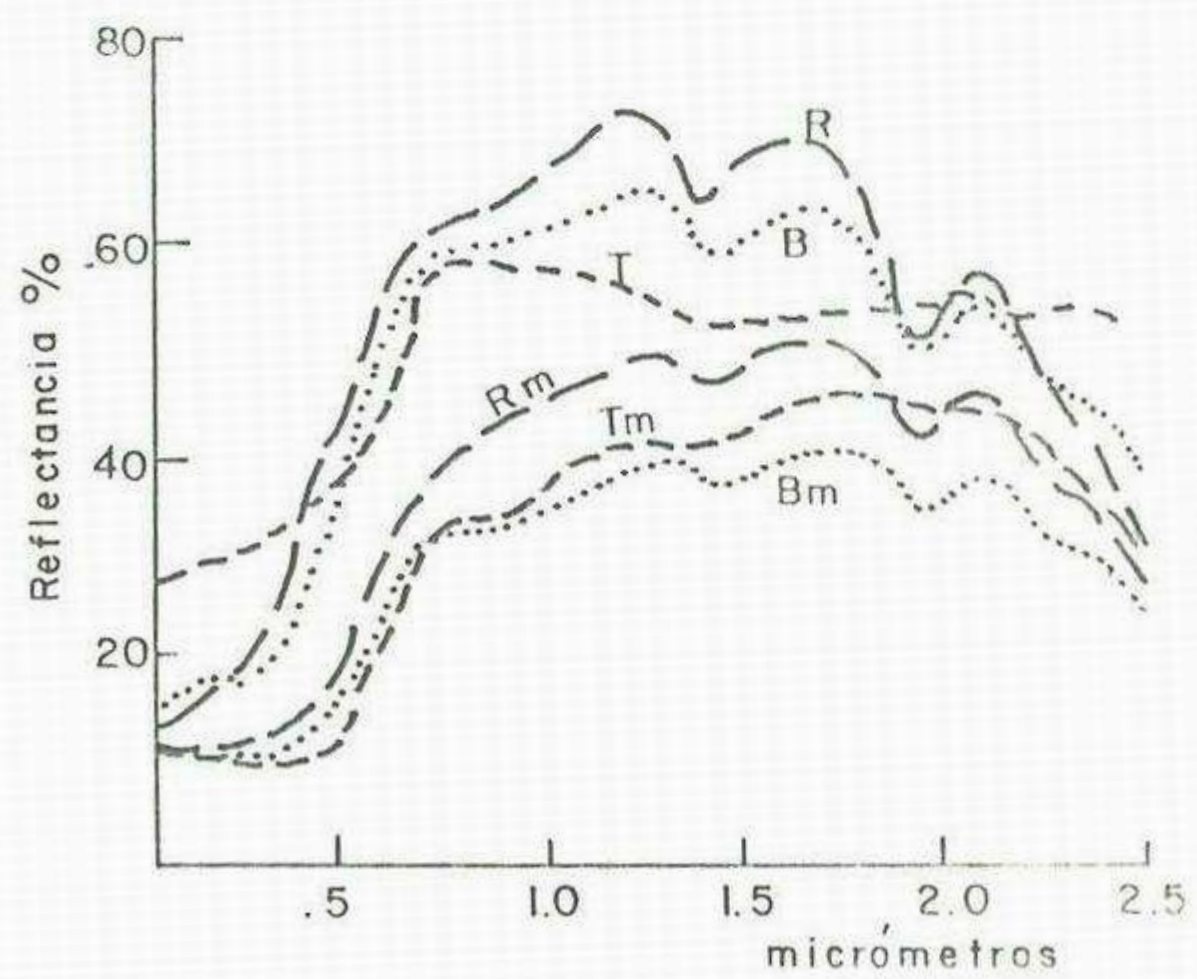


FIGURA 17 - Reflectancia espectral de rocas frescas y meteorizadas.

R = Riolita  
 B = Basalto alterado  
 T = Toba  
 Subíndice m = meteorizado



rocas mineralizadas y no mineralizadas, a veces como mineral accesorio en rocas ígneas y en otras como mineral esencial.

La calcita pura es incolora y blanca, con alta reflectancia cuando se tritura hasta alcanzar granos finos.

La reflectancia espectral de algunos minerales de común ocurrencia, es descrita por Hovis especialmente sulfatos y nitratos.

La variedad en composición de estos minerales, así como sus posibles alteraciones hacen que esté fuera del objetivo de este escrito, el presentar una revisión completa del tema.

Las rocas presentan gran variación, ocasionada no solo por su composición mineralógica sino también por el grado de alteración (fig. 17). Al igual que con los demás cuerpos analizados, el interprete debe conocer ampliamente las características de cada tipo de roca para poder interpretar acertadamente su apariencia en los diversos productos de percepción remota.



## 5.- EL SATELITE LANDSAT

### 5.1 Reseña Histórica.

La serie de satélites conocidos como Landsat es parte de la evolución de un concepto que nació de las observaciones fotográficas de los vuelos orbitales de Mercurio y Géminis. Los datos de las misiones mencionadas demostraron el uso práctico de observar desde el espacio la superficie terrestre y sus diferentes recursos. Las observaciones y análisis que de allí se derivaron, permitieron a la NASA, a través de su programa de satélite, desarrollar el ERTS-1, que más tarde tomó el nombre de LANDSAT-1.

Las imágenes tomadas por el ERTS-1, permitieron demostrar su gran utilidad en los estudios de los recursos naturales de la tierra.

En 1967 la NASA a través de un equipo de estudio, recomendó como principal sensor de Landsat un sistema similar a la televisión, llamada cámara de vidicon de haz de retorno (RBV), el cual tomaría imágenes aparentemente similares a las fotografías aéreas bien conocidas en esa época, sólo que éstas serían enviadas a través de telemetría a una estación receptora aquí en la tierra. En estudios posteriores, se llegó a la conclusión de que las imágenes de RBV podían ofrecer buena resolución espacial mas no así resolución espectral, por lo cual se aconsejó un barrador multiespectral (MSS).

La decisión de incluir el MSS dentro de la carga útil del satélite resultó ser un acierto, pues éste ha sido la clave del suceso de LANDSAT.



Después de todas las consideraciones de diseño, funcionamiento y posibles aplicaciones, la NASA empezó el programa Landsat con el lanzamiento del primer satélite en julio 23 de 1972, el cual dejó de operar en junio 6 de 1978; Landsat-2 fue lanzado en enero 22 de 1975 y dejó de operar en enero 27 de 1980, pero reactivado en mayo 27 de 1980 para finalmente ser desactivado y puesto fuera de órbita en julio 27 de 1983; Landsat 3 fue lanzado en marzo 5 de 1978 y desactivado parcialmente en diciembre de 1980, reinició operaciones en abril 13 de 1981 y dejó de funcionar en diciembre 7 de 1983; Landsat-4 fue lanzado el 16 de julio de 1982 y Landsat-5 fue lanzado en marzo 1 de 1984. Landsat 4 y 5 son los únicos satélites de la serie en funcionamiento.

## 5.2 Descripción General del Programa.

El programa Landsat opera con sensores pasivos, esto es, captan solo energía reflejada. La fuente básica de energía es el sol que emite un haz coherente de radiación electromagnética, esta radiación sufre una serie de transformaciones en su interacción con la atmósfera y con la superficie terrestre, desde donde es reflejada y pasa nuevamente a través de la atmósfera.

La energía reflejada, es captada por los sensores y registrada en forma digital; estos datos pueden ser enviados directamente a la tierra (tiempo real) o grabados y posteriormente se transmiten a tierra por medio de un sistema de telemetría. ( Fig. 18 ).

Las estaciones terrestres reciben información que luego es procesada para introducir correcciones geométricas, radiométricas,



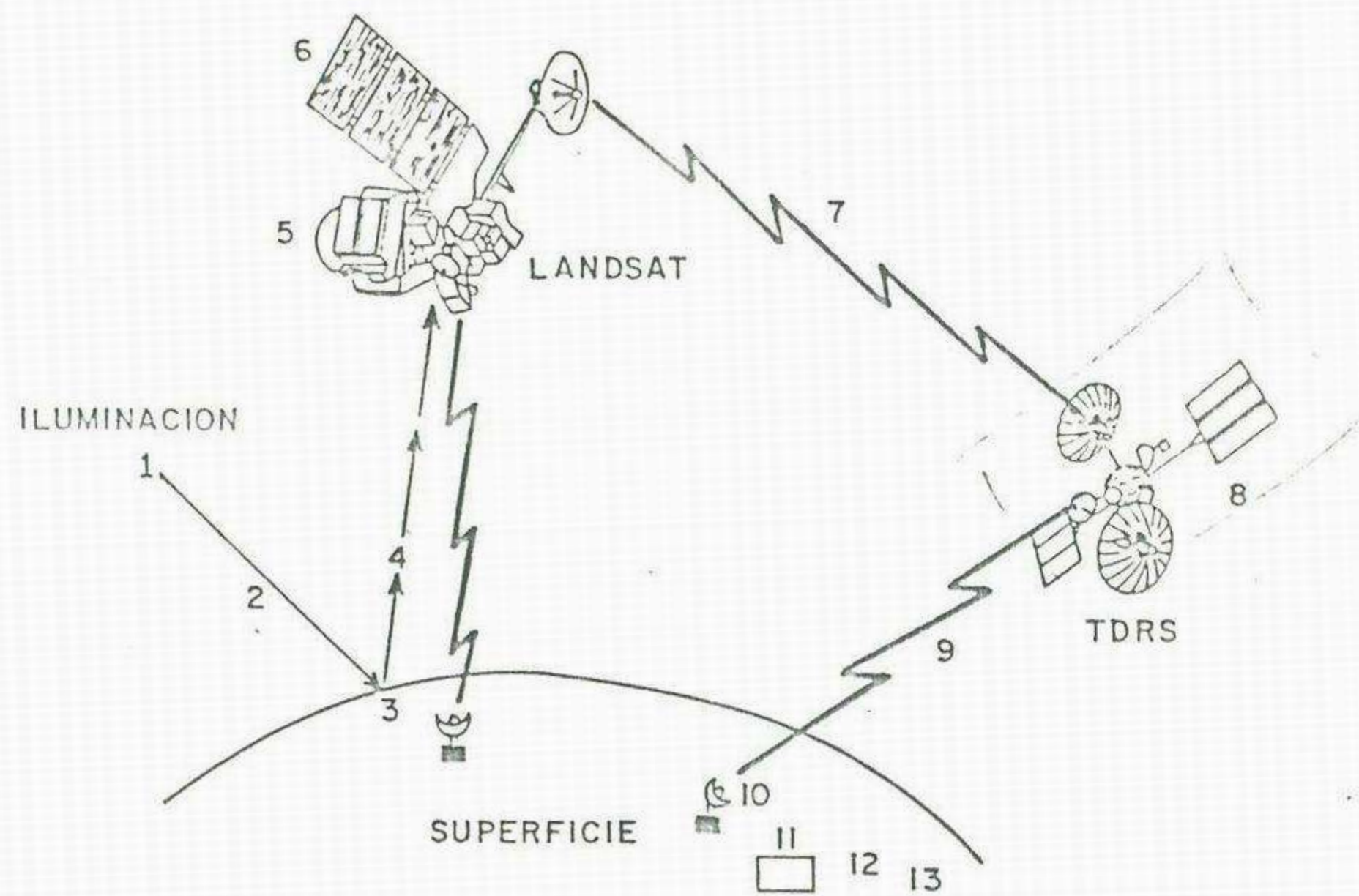


FIGURA 18 Sistema Landsat, satélite para muestreo, retransmisión de datos y estaciones receptoras.

- 1- Iluminación solar;
- 2- Iluminación solar. Modificada por el paso a través de la atmósfera;
- 3- Reflexión del terreno;
- 4- Propagación a través de la atmósfera, de la energía reflejada;
- 5- Percepción de la señal en el satélite;
- 6- Suministro de potencia de las células solares;
- 7- Procesamiento de la señal y envío al TDRS vía telemétrica;
- 8- Recepción de la señal por el TDRS;
- 9- Propagación a través de la atmósfera;
- 10- Telemetría recibida por la estación terrestre;
- 11- Procesamiento de la señal para correcciones geométricas, radiométricas, etc.;
- 12- Transmisión al Banco de Datos;
- 13- Distribución al público.



etc.. Esta información es distribuida al público, bien sea como cintas compatibles con computador, o como material fotográfico.

### 5.3 Control de Operaciones.

El centro de control de operaciones está ubicado en Goddard Space Flight Center, Greenbelt Maryland y tiene a su cargo todo el comando de operaciones orbitales. Este centro origina las órdenes para la nave espacial y los sistemas permiten la observación permanente de los subsistemas de operación de las naves espaciales.

### 5.4 Estaciones Receptoras.

Las estaciones receptoras son los lazos radiotelemétricos entre los satélites y la tierra. Se pueden ubicar en dos categorías:

1) Las estaciones que tienen la única función de recibir información del satélite.

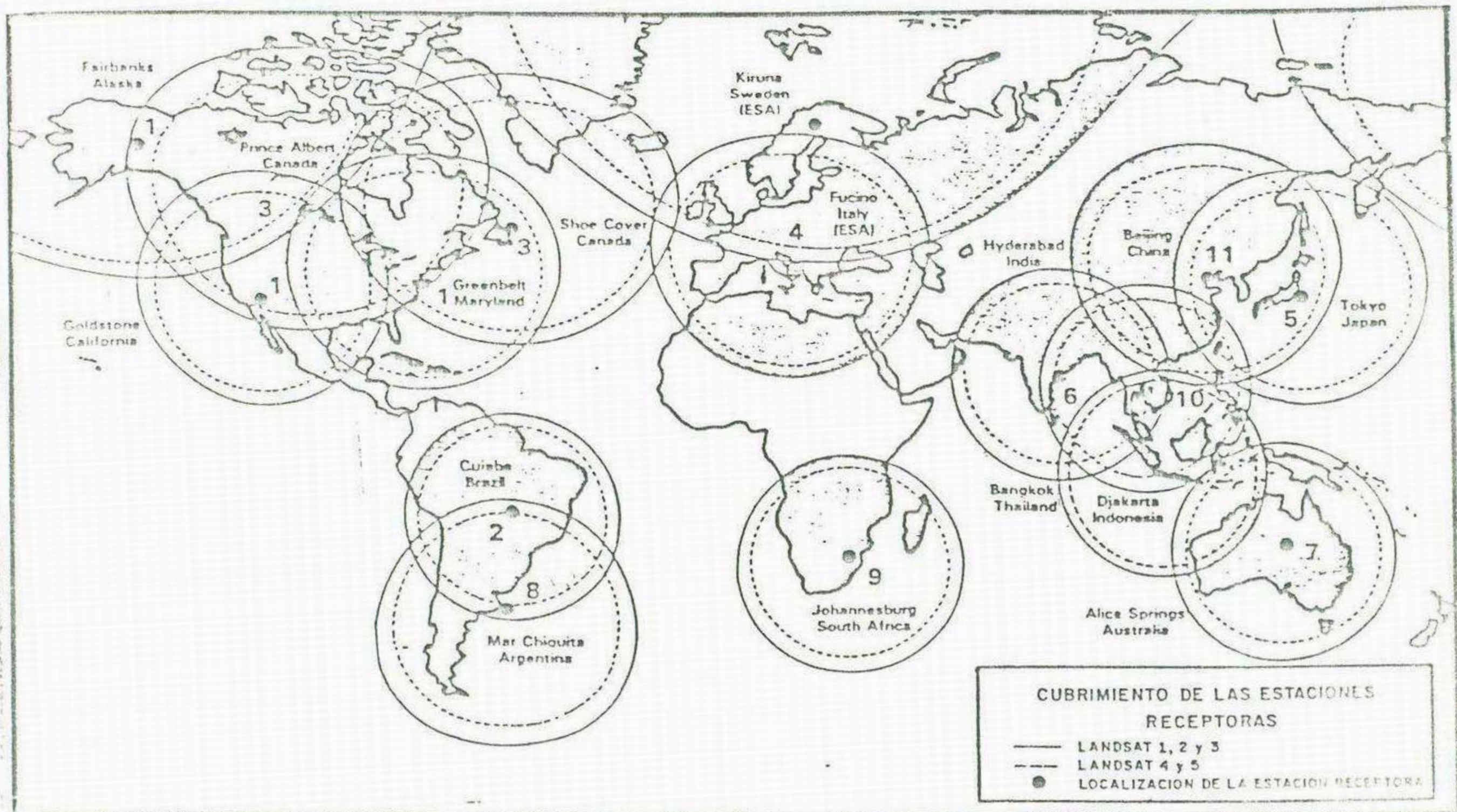
2) Aquellas que además de recibir información, pueden recibir comandos de funcionamiento y mantenimiento del satélite y transmiten instrucciones y comandos.

Las primeras son las ubicadas fuera de USA y en el segundo grupo están las tres estaciones localizadas en territorio norteamericano.

La figura 19, muestra la distribución de las estaciones receptoras terrestres.

El radio común de operaciones de cada una de estas estaciones, es de 2789 Kmts.. Cabe anotar que los países del Area del Caribe, así como el norte de Colombia, Venezuela ,





**CENTROS INTERNACIONALES PARA LA DISTRIBUCION DE DATOS LANDSAT**

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <p>1 User Services Section<br/>EROS Data Center<br/>U.S. Geological Survey<br/>Sioux Falls, South Dakota 57198</p> <p>2 Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE)<br/>Departamento de Producao de Imagens<br/>ATUS-Banco de Imagens Terrestres<br/>Rondonia Presidente Dutra, Km 210<br/>Cachoeira Paulista-CeP 12.630<br/>Sao Paulo, Brazil</p> <p>3 Canadian Centre for Remote Sensing (CCRS)<br/>User Assistance and Marketing Unit<br/>717 Belfast Road<br/>Ottawa, Ontario K1A 0Y7<br/>Canada</p> <p>4 European Space Agency (ESA)<br/>Earthnet User Services<br/>Via Galileo Galilei<br/>600 44 Frascati, Italy</p> | <p>5 Remote Sensing Technology Center (RESTEC)<br/>7-15-17 Roppongi, Minato-Ku<br/>Tokyo 106, Japan</p> <p>6 Director, National Remote Sensing Agency<br/>No. 4 Sardar Patel Road<br/>Hyderabad-500 003<br/>Andhra Pradesh, India</p> <p>7 Australian Landsat Station<br/>14-16 Oatley Court<br/>P.O. Box 28<br/>Belconnen, A.C.T. 2616<br/>Australia</p> <p>8 Comision Nacional de Investigaciones<br/>Espaciales (CNIE)<br/>Centro de Procesamiento<br/>Dorrego 4010<br/>(1425) Buenos Aires, Argentina</p> | <p>9 Director, National Institute for Telecommuni-<br/>cations Research<br/>ATTN: Satellite Remote Sensing Centre<br/>P.O. Box 3718<br/>Johannesburg 2000<br/>Republic of South Africa</p> <p>10 Remote Sensing Division<br/>National Research Council<br/>Bangkok 9<br/>Thailand</p> <p>11 Academia Sinica<br/>Landsat Ground Station<br/>Beijing<br/>People's Republic of China</p> |
|---|---|---|

FIGURA 19 Estaciones receptoras de datos Landsat en el mundo y direcciones de los centros distribuidores. (Tomado Data Users Note # 21).



Ecuador, aparecen colocados en una situación desventajosa, porque quedan fuera del área de cubrimiento de las estaciones del Norte y Sur América.

### 5.5 Órbita y Recubrimiento.

La órbita seleccionada para la serie de satélites Landsat corresponde a una órbita circular, casi polar, repetitiva, así que pasa por el mismo sitio cada 18 días para Landsat 1, 2 y 3, y cada 16 días para Landsat 4 y 5. Es sincrónica con el sol, con el objeto de tener iluminación constante, la altura de la órbita en el Ecuador es 913 Kmts. para Landsat 1, 2 y 3, y 705 Kmts. para Landsat 4 pasando por el Ecuador aproximadamente a las 9:30 a.m. tiempo local.

Cada órbita se cumple en 103 minutos, con un promedio de 13.9 órbitas por día para Landsat 1, 2 y 3, y de 99 minutos o 14.5 órbitas por día para Landsat 4 y 5.

Las órbitas logradas en un mismo día están separadas entre sí 2869 Kmts. para Landsat 1, 2 y 3, y de 2752 Kmts. para Landsat 4 y 5 que corresponde al espacio recorrido por la tierra en dirección occidente-oriente, durante el tiempo que dura la órbita (Fig. 20) este espacio es cubierto en pasos sucesivos en diferentes días.

La distancia aproximada entre órbitas adyacentes en días sucesivos a nivel del Ecuador es de 159 Kmts. para Landsat 1, 2 y 3, alcanzando un recubrimiento entre escenas de 14%, y de 171 Kmts. para Landsat con recubrimiento de 7.6%; este recubrimiento aumenta hacia los polos teniendo en cuenta que la faja de 185 Kmts., cubierta por el satélite, permanece constante.



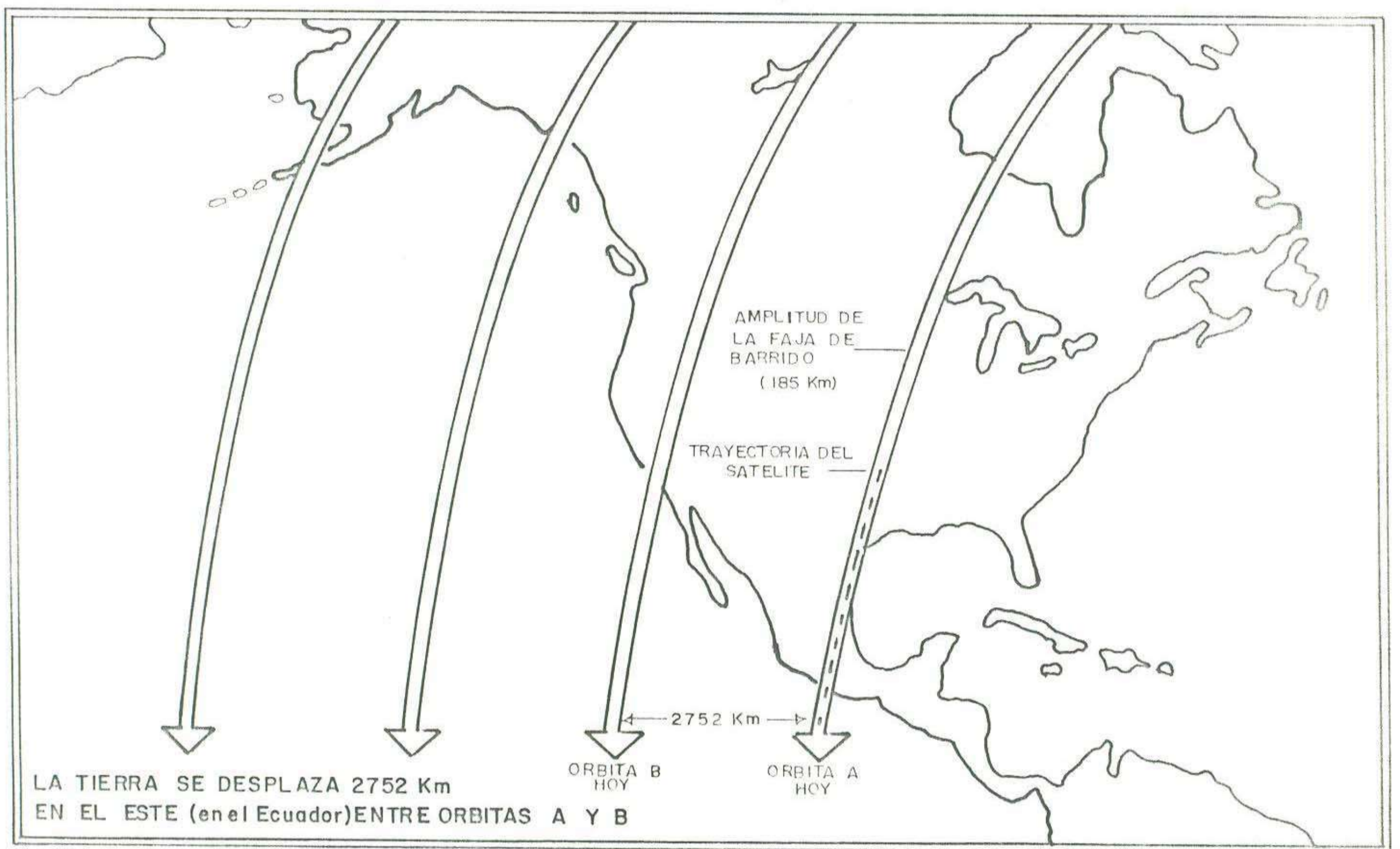


FIGURA 20 - Distancia entre órbitas de un mismo día.



La captación de información por parte del satélite, se efectúa solo en sentido norte-sur; cuando se desplaza de sur a norte recorre el lado oscuro de la tierra, por lo tanto, es imposible obtener información, ya que los sensores captan energía reflejada; esta parte del recorrido es utilizado solo para bandas termales.

El proceso de barrido continuo del MSS produce una imagen cada 28 segundos aproximadamente, que corresponde a una distancia en el terreno a lo largo de su trayectoria de 185 Kms.. Durante el proceso se separan los puntos centrales de cada imagen a una distancia que corresponde a intervalos de 25 segundos, lograndose así un recubrimiento de un 10% en las imágenes sucesivas durante una órbita.

Para Landsat 1, 2 y 3, el sistema de referencia mundial estableció 251 órbitas, correspondientes con las necesarias para cubrir la tierra en un ciclo de 18 días, de tal manera que la órbita 252 correspondería a la número uno y el ciclo comenzaba otra vez. En Landsat 4 y 5, como el ciclo de 16 de cobertura requiere de 233 órbitas, se ha hecho una modificación al sistema mundial de referencia y se han publicado mapas índices con la localización de los centros de las escenas, definidas por la intersección de órbitas y líneas (path y rows).

En la parte medular del sistema está localizado el llamado "anillo sensor" el cual contiene el paquete de sensores. Las diferencias en el paquete de sensores entre Landsat 1, 2, 3; y Landsat 4 y 5 aparecen en la tabla 1.





Satélite	Sensor	RBV	MSS	MT
Landsat 1, 2	3 cámaras		4 bandas	0
Landsat 3	2 cámaras		5 Bandas (incluye 1 banda termal)	0
Landsat 4, 5		0	4 bandas	7 bandas (incluye 1 banda termal)

TABLA 1. Diferentes sensores en la serie Landsat.



## 5.6 Barredor Multiespectral (MSS).

El Barredor multiespectral del sistema Landsat es un sistema de barrido de líneas generalmente descrito como barredor óptico-mecánico el cual fué inicialmente diseñado para el registro de radiación termal.

El MSS usado en la serie Landsat es un barredor de 4 bandas para Landsat 1, 2, 3, 4, y 5, y de 5 bandas para Landsat 3. Utiliza un movimiento transversal exploratorio de 185 Kmts. de ancho y toma simultáneamente seis líneas en cada una de las bandas espectrales.

El terreno es barrido por medio de un espejo giratorio que recorre un campo transversal de 11.56 grados con un campo visual instantáneo que cubre un cuadrado de 79 metros de lado.

### 5.6.1 Funcionamiento del Barredor. (Fig. 21 y 22 ).

La reflectancia de la radiación solar recibida por los objetos es captada por un espejo oscilante. Las oscilaciones del espejo tienen lugar en una dirección perpendicular a la línea de vuelo u órbita y cubre un ángulo de 11.56 grados. Este ángulo, que determina el campo de vista, en combinación con la altitud de 918 Kmts. del satélite, define la longitud de la franja de barrido, que es de 185 Kmts. (= 100 millas náuticas).

La colección de datos tiene lugar solamente durante la parte de la oscilación que mueve el espejo hacia el Este. La otra parte de la oscilación (el retorno) se utiliza para calibrar los sensores. Durante cada oscilación se barren simultáneamente seis líneas, así en un barrido se registran simultáneamente seis líneas (Fig. 24 ).



### Componentes del sistema.

El sistema tiene los siguientes componentes.

- Espejo oscilante
- Sistema óptico
- Sistema detector / sensor
- Amplificador y sistema de registro
- Sistema de transmisión y almacenamiento de datos

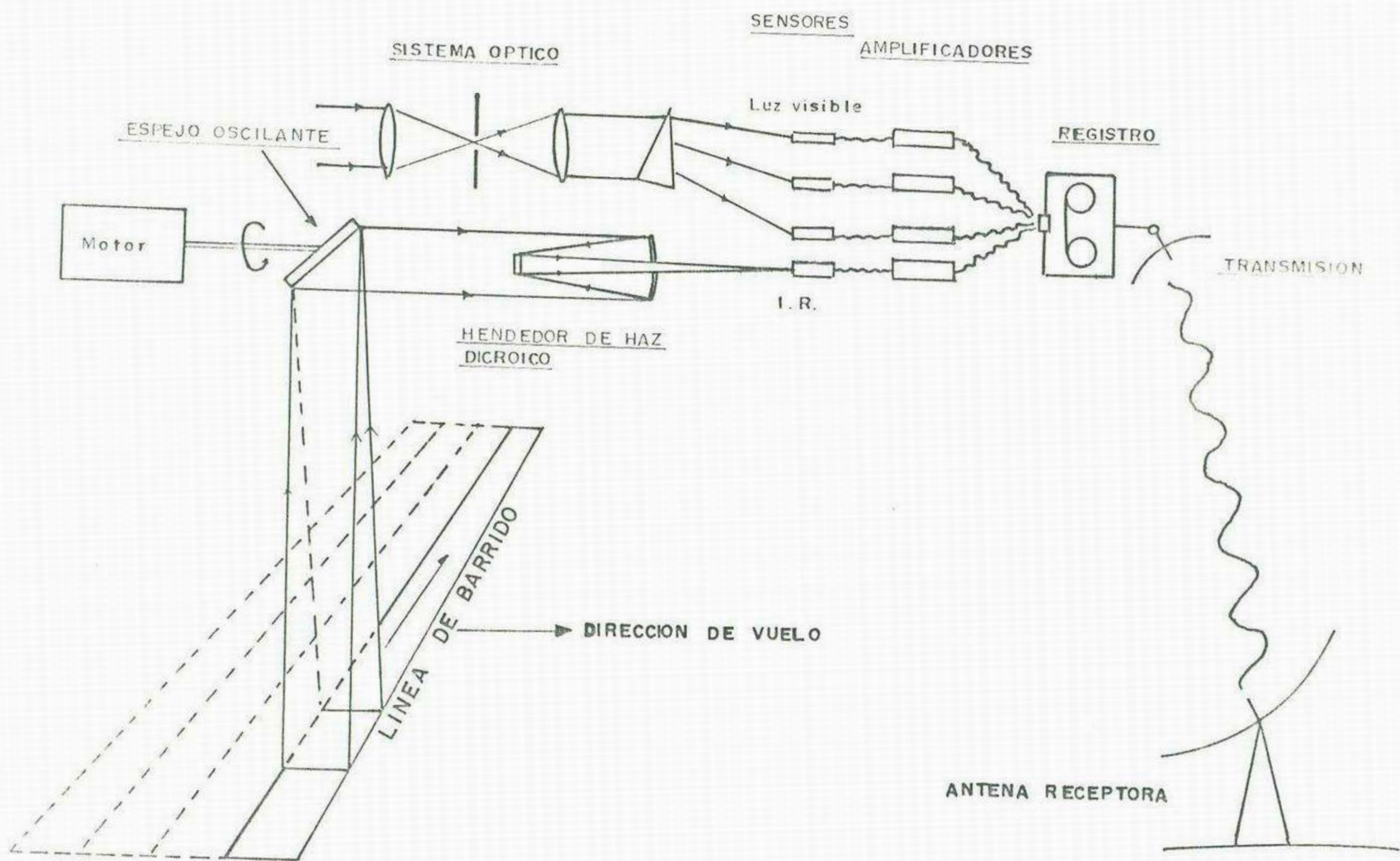


FIGURA 21- Sistema del barredor óptico-mecánico.



## BARREDOR MULTIESPECTRAL

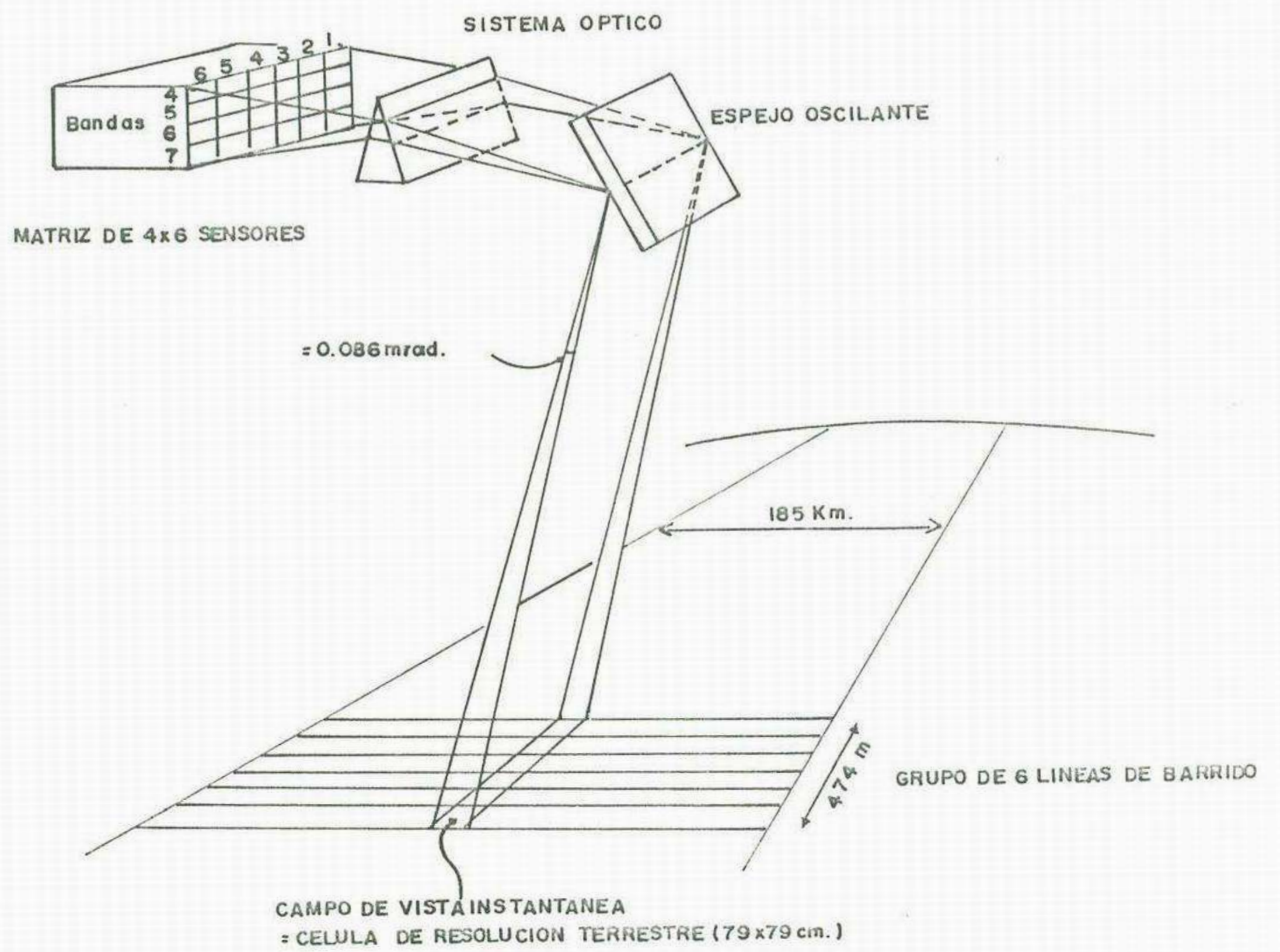


FIG. 22 FUNCIONAMIENTO DEL BARREDOR MULTIESPECTRAL



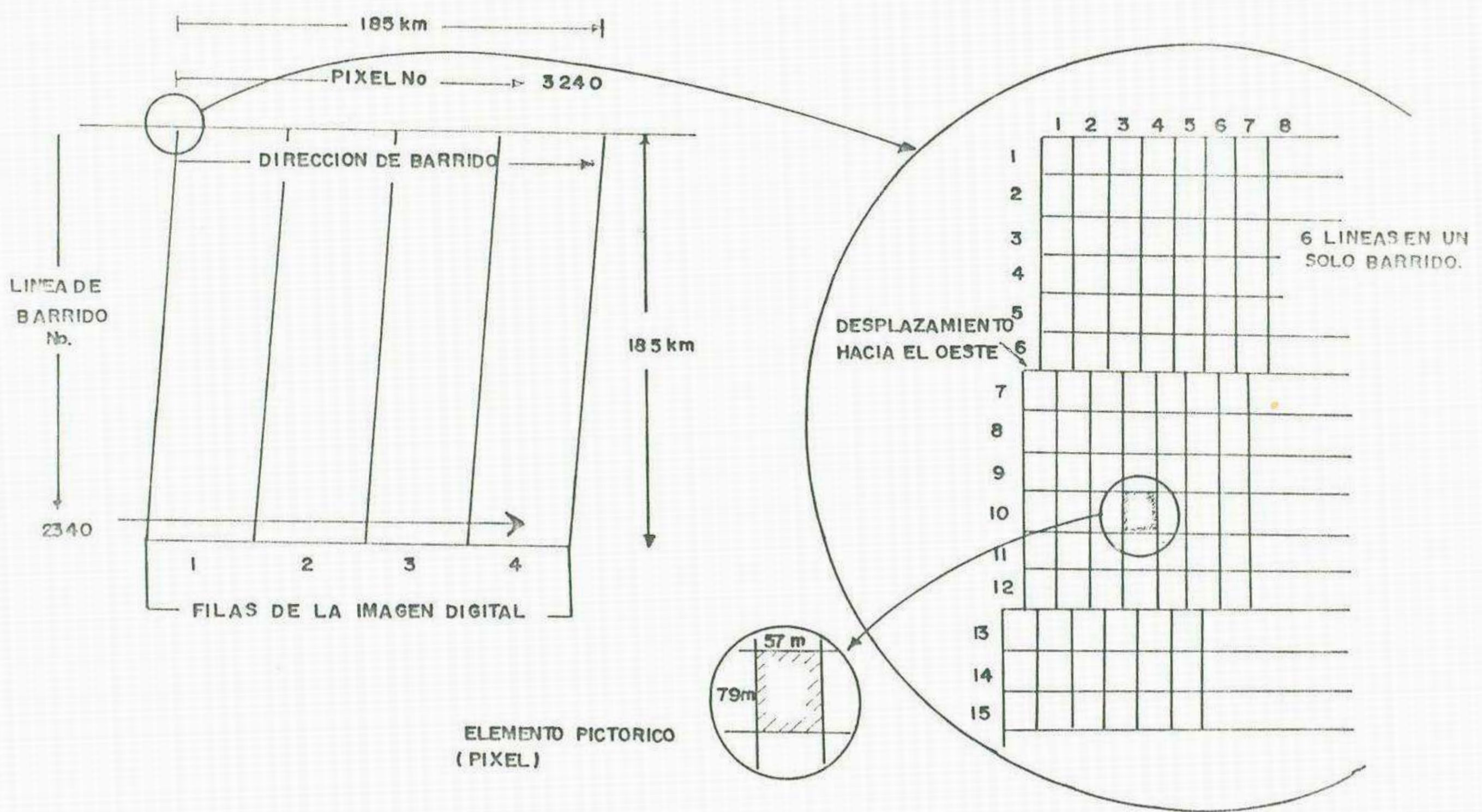


FIG. 23 - COMPOSICION DE UNA IMAGEN LANDSAT POR ELEMENTOS PICTORICOS

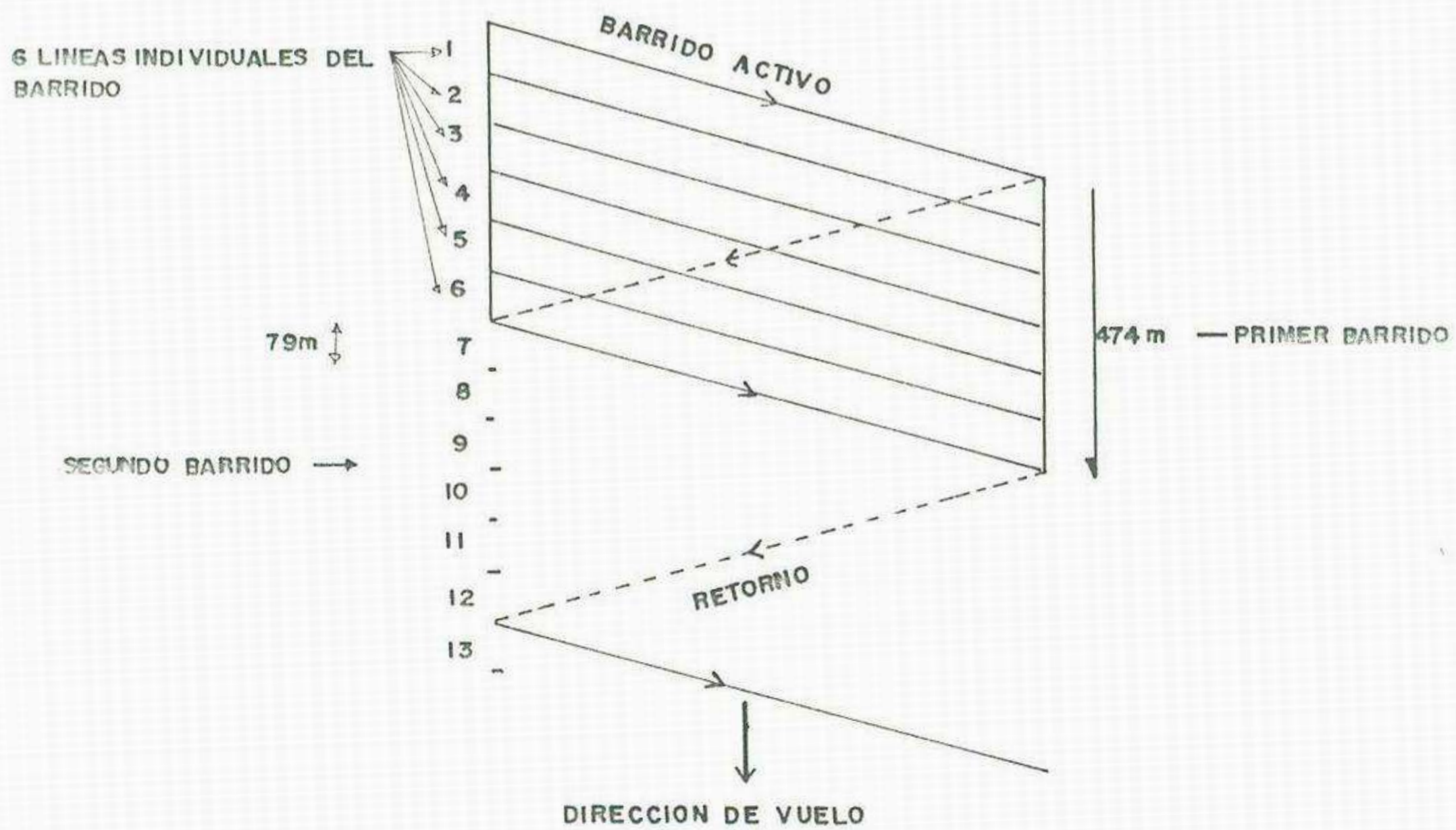


FIG. 24 - CONFIGURACION DE LAS LINEAS DE BARRIDO LOGRANDO 100% DE COBERTURA DE LA FAJA.



Una imagen está compuesta por 2340 líneas de barrido en la dirección del vuelo, lo cual corresponde a 79 metros en el terreno (185 kmts dividido por 2340). (Fig. 23 ).

El espejo cumple 13.62 oscilaciones por segundo, por tanto, una oscilación (que consiste en un barrido activo y su retorno) dura 0.7324 segundos y durante este tiempo el satélite avanza una distancia de 474 metros a lo largo de su trayectoria que corresponde exactamente a seis líneas de barrido, cada una de 79 mts de ancho. Esta configuración del avance del satélite, la duración del barrido y anchura de las seis líneas de barrido, resulta en que la primera línea de barrido de la segunda oscilación (es decir la línea 7), se encuentra al lado de la sexta línea de barrido de la primera oscilación (Fig. 24) De esta manera se logra una cobertura del terreno del 100 %.

La configuración de 13.62 oscilaciones por segundo y de 2340 líneas de barrido distribuido en grupos de seis, cubriendo una distancia de 185 Kmts. implica que para producir una imagen se requieran 28.6 segundos. El área de una imagen, cubre unos 34 220 Kmts. cuadrados (185 \* 185 Kmts.).

El campo de vista instantáneo del sistema espejo/sensor cubre un ángulo de 0.086 mrad que a una altura del satélite de 918 Kmts. define una distancia en el campo de 79 metros en la dirección del barrido. En la dirección de vuelo cada barrido del espejo cubre una distancia de 474 mts. como ya se ha visto. El espejo capta la radiancia de una área terrestre que mide 79 \* 474 mts.. Sin embargo, la radiancia de esta área captada por el espejo, es dividida por un sistema de seis detectores en seis porciones, que corresponden con seis fajas, cada una de 79 mts.



de ancho. Resulta en que el campo de vista instantáneo del sistema MSS-Landsat mide 79 \* 79 mts. sobre el terreno y esto se ha denominado la célula de resolución terrestre que define la óptima resolución espacial del sistema MSS-Landsat, pero no corresponde al tamaño real del pixel (fig. 23 ).

La energía captada por el espejo pasa por un sistema óptico. Este sistema óptico separa la energía a través de un sistema de prismas en cuatro o cinco bandas de longitudes de onda. Luego una serie de espejos parabólicos enfoca cada haz de cada banda sobre el detector respectivo.

Las bandas son:

	Landsat 4 y 5		Landsat 1,2,3
Espectro visible	Banda 1: 0.5--0.6	verde	Banda 4
	Banda 2: 0.6--0.7	rojo	Banda 5
Infrarrojo cercano	Banda 3: 0.7--0.8		Banda 6
	Banda 4: 0.8--1.1		Banda 7
Infrarrojo termal	Banda 8: 10.4-12.6		solo Landsat 3

El registro de los niveles de radiancia en forma digital puede tener una definición con un rango de 0-63, es decir 0, 1, 2, 3, ... etc. y esto se denomina un sistema de 6-Bit. Se puede lograr mejor definición, ampliando el rango a 123 o 256 niveles. El Bit en el lenguaje de computación es un dígito binario que es un exponente de la base 2, así:

- Sistema 6-Bit             $2^{\text{exp.6}} = 64$ : niveles de 0 - 63
- Sistema 7-Bit             $2^{\text{exp.7}} = 128$ : niveles de 0 - 127
- Sistema 8-Bit             $2^{\text{exp.8}} = 256$ : niveles de 0 - 255



### 5.6.2 Composición de Imágenes.

Cada línea de barrido consiste de 3240 muestras que corresponden cada una, a una distancia de 57 mts. en el campo. Entonces se ha multiplicado por un factor 1.4 los 3240 elementos que correspondieron a las células de resolución terrestre de 79 mts. (Fig. 25 ).

Los valores digitales de estas muestras que pueden ser transformados otra vez a intensidades de radiación en forma de niveles de gris y servir como base para la construcción de una imagen. Por otra razón se ha denominado a las muestras, elementos pictóricos. El tamaño de un pixel en términos de área que cubre en el campo es de  $79 * 57$  mts.,. Nótese que un pixel no es igual o idéntico a una célula de resolución terrestre. Con diferentes intervalos de muestreo el pixel podría tener otro tamaño, mientras que las dimensiones de la célula de resolución terrestre están fijadas por los parámetros técnicos del sistema y determinan la resolución óptima espacial del sistema MSS-Landsat.

La imagen de una escena Landsat de  $185 * 185$  Kmts. contiene 2340 líneas de barrido, cada una con 3240 pixels, y eso resulta en una cantidad de alrededor de 7.6 millones de pixels. Cada uno de los pixels está caracterizado por un número digital (DN) en cada banda. Además de la anterior información se registran la posición geográfica, definida por sus coordenadas X-Y.

El medio de registro de datos son las llamadas cintas de alta densidad. En estas cintas hay varios archivos con información acerca de coordenadas del centro de la imagen, fecha



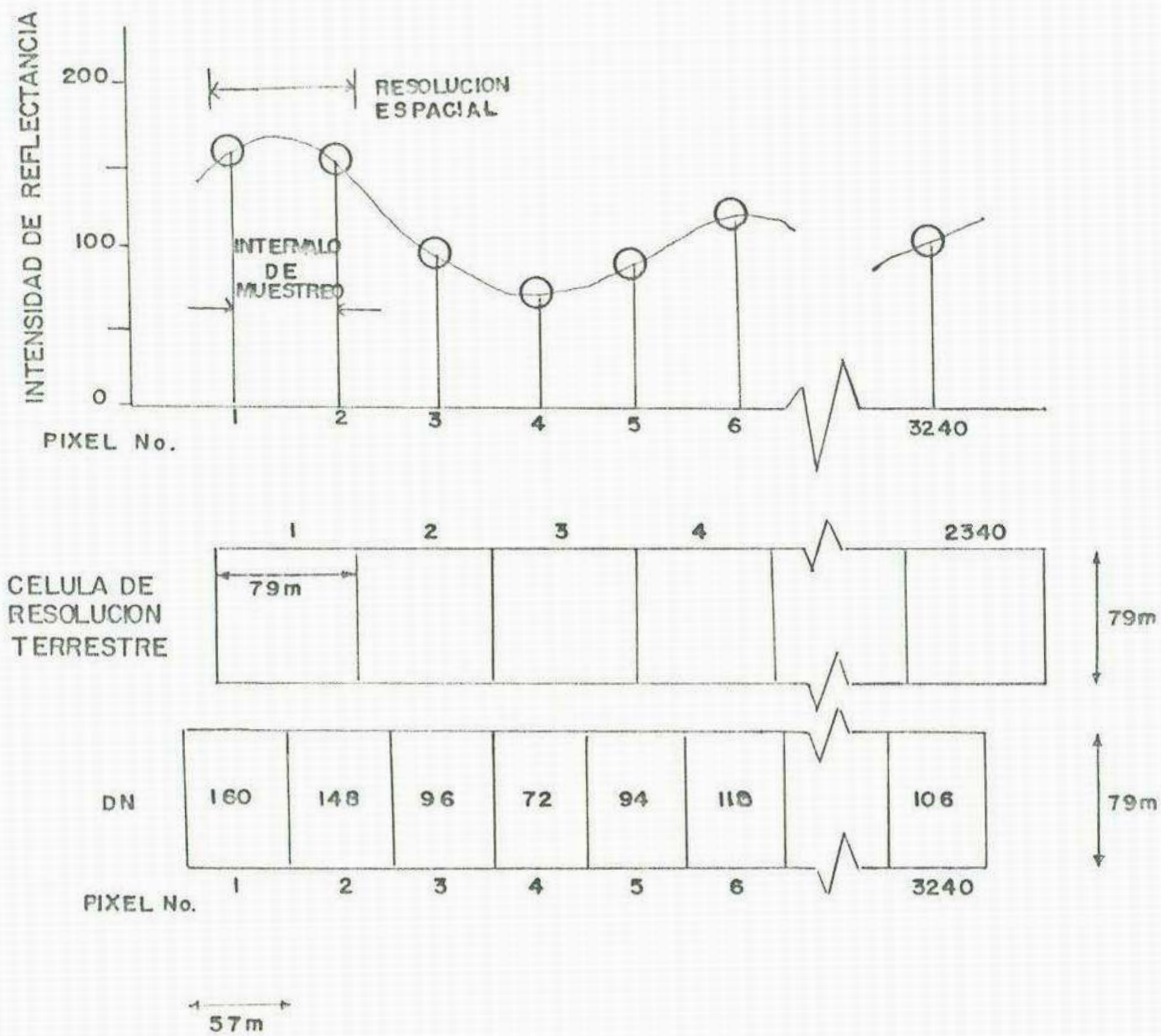


FIGURA 25 - Muestreo de señal análoga produciendo elementos pictóricos.



y hora de toma, etc.,. En una cinta de alta densidad se pueden almacenar hasta 100 imágenes Landsat MSS.

### 5.7 Mapeador Temático (TM).

Este sensor, al igual que el barrador multiespectral capta la información por medio de un espejo oscilante que "barre" el terreno en sentido perpendicular al desplazamiento del satélite.

El mapeador temático está montado en la nave en posición horizontal y en su parte anterior (en relación con el desplazamiento en la órbita) mirando directamente hacia la tierra, a través de una abertura encima de la cual se encuentra el montaje del espejo oscilante con su mecanismo matriz, sistema electrónico y el monitor de barrido. La parte más importante es el telescopio en el cual están colocados el espejo oscilante (la entrada), el espejo secundario (aproximadamente en la mitad, en sentido longitudinal) y el espejo terciario (interpuesto entre el secundario y el oscilatorio); directamente detrás del espejo primario están el corrector de barrido, el calibrador interno y el plano focal del detector para el rango visible con su montaje y mecanismos de alineación.

#### 5.7.1 Funcionamiento del sistema.

El espejo oscila en sentido Este-Oeste (perpendicular a la dirección de la órbita) y capta información tanto en su oscilación hacia el Este, como durante su regreso al punto inicial (a diferencia del MSS que solo capta información en su desplazamiento en sentido Este-Oeste), esto permite reducir la



frecuencia de las oscilaciones produciendo mejor precisión radiométrica. Los arreglos de detectores están ubicados dentro del plano focal primario de la óptica del instrumento, permitiendo la entrada de luz directamente a los detectores sin transmisión a través de fibras ópticas (como se hace en el MSSR). Esta configuración minimiza cualquier pérdida de intensidad en la energía que llega.

El mapeador temático capta datos radiométricos en las 7 bandas espectrales. Cuando el espejo oscila 7 veces por segundo en sentido perpendicular a la órbita, forma una trama de 14 líneas en las bandas 1, 2, 3, 4, 5, 7, y de 4 líneas en la banda 6 para cada dirección de oscilación; los datos se captan en ambos sentidos de oscilación.

#### 5.7.2 Rango espectral.

El mapeador temático opera en 7 bandas espectrales. La selección de bandas para este sensor fue objeto de considerable estudio y debate; después de los cuales, se designaron los siguientes rangos espectrales:

- Banda 1. (0.45-0.52 micrómetros). Diseñada para penetración en cuerpos de agua, por lo cual se considera de especial utilidad en mapeo de aguas costeras. Útil así mismo para diferenciación entre suelo y vegetación, también para distinguir entre vegetación de latifoliadas y coníferas.

- Banda 2. (0.52-0.60 micrómetros). Diseñada para medir el pico de reflectancia de la vegetación para estimación de su vigor.



- Banda 3. (0.60-0.69 micrómetros). Banda de absorción de la clorofila, importante para discriminación de la vegetación.

- Banda 4. (0.76-0.90 micrómetros). Util para determinación de biomasa y para delineación de cuerpos de agua.

- Banda 5. (1.55-1.75 micrómetros), Indicativa del contenido de humedad en las plantas y en suelo. También util para distinguir nieve de nubes.

- Banda 6. (10.40-12.50 micrómetros). Banda del infrarrojo termal para uso en el análisis del stress en la vegetación, discriminación en humedad del suelo y mapeo termal.

- Banda 7. (2.08-2.35 micrómetros). Seleccionada por su potencial para discriminar tipos de rocas y para mapeo hidrométrico.

La selección de bandas, hizo énfasis en el monitoreo de la vegetación, con excepción de la banda 7 diseñada específicamente para aplicaciones geológicas, tabla 2.

### 5.7.3 Resolución espacial.

El mapeador temático tiene resolución sobre el terreno, considerablemente mejor, que la obtenida para el barredor multiespectral. El tamaño del pixel (resolución sobre el terreno) en 30 mts. en todas las bandas, excepto la banda 6, lo cual permitirá la clasificación de áreas con tamaños entre 0.3 y 1.2 hectáreas. La banda 6 (termal) tendrá pixels de 120 mts.

### 5.8 EL PROGRAMA SPOT.

El programa Spot es actualmente uno de los más importantes



	Landsat 1 y 2	Landsat 3
Número de cámaras	3	2
Resolución espectral por bandas ( m ):		
Cámara 1	0.475-0.575	0.505-0.750
Cámara 2	0.580-0.680	
Cámara 3	0.698-0.830	
Cobertura en el terreno (Km)	185x185	98x98
Resolución (m)	79	38
Tiempo del ciclo (s)	25	12.5
Peso del subsistema (lbs)	203	167

TABLA 2.

(Tomado parcialmente del manual de sensores remotos. pag. 531)



programas espaciales para el estudio de los recursos naturales. Los diseñadores concibieron un sistema que ofreciese los rangos espectrales más adecuados para el estudio de los recursos naturales, así como la posibilidad de observación estereoscópica y rangos de resolución espacial y temporal, considerablemente mejores que los obtenidos en los demás programas con objetivos similares.

#### Características del sistema:

- Cobertura sistemática de la tierra con alta resolución espacial.
- Incremento de la frecuencia de observación total gracias a la mirada lateral.
- Posibilidad de cobertura estereoscópica.
- Carácter operacional del sistema diseñado para satisfacer los requerimientos de los usuarios.

El objetivo primordial de Spot es el proporcionar información para estudios de :

- Utilización de los suelos y evolución del medio ambiente
- Evaluación de los recursos naturales (Agricultura, bosques, etc.).
- Exploración de los recursos minerales y energéticos.
- Realización de trabajos cartográficos a escalas medias (1: 100 000), revisión y actualización de cartografía existente a escalas del orden de 1: 50 000.

#### 5.8.1 Estructura del Programa.

El centro de control y programación de misiones está a cargo







# EL SISTEMA

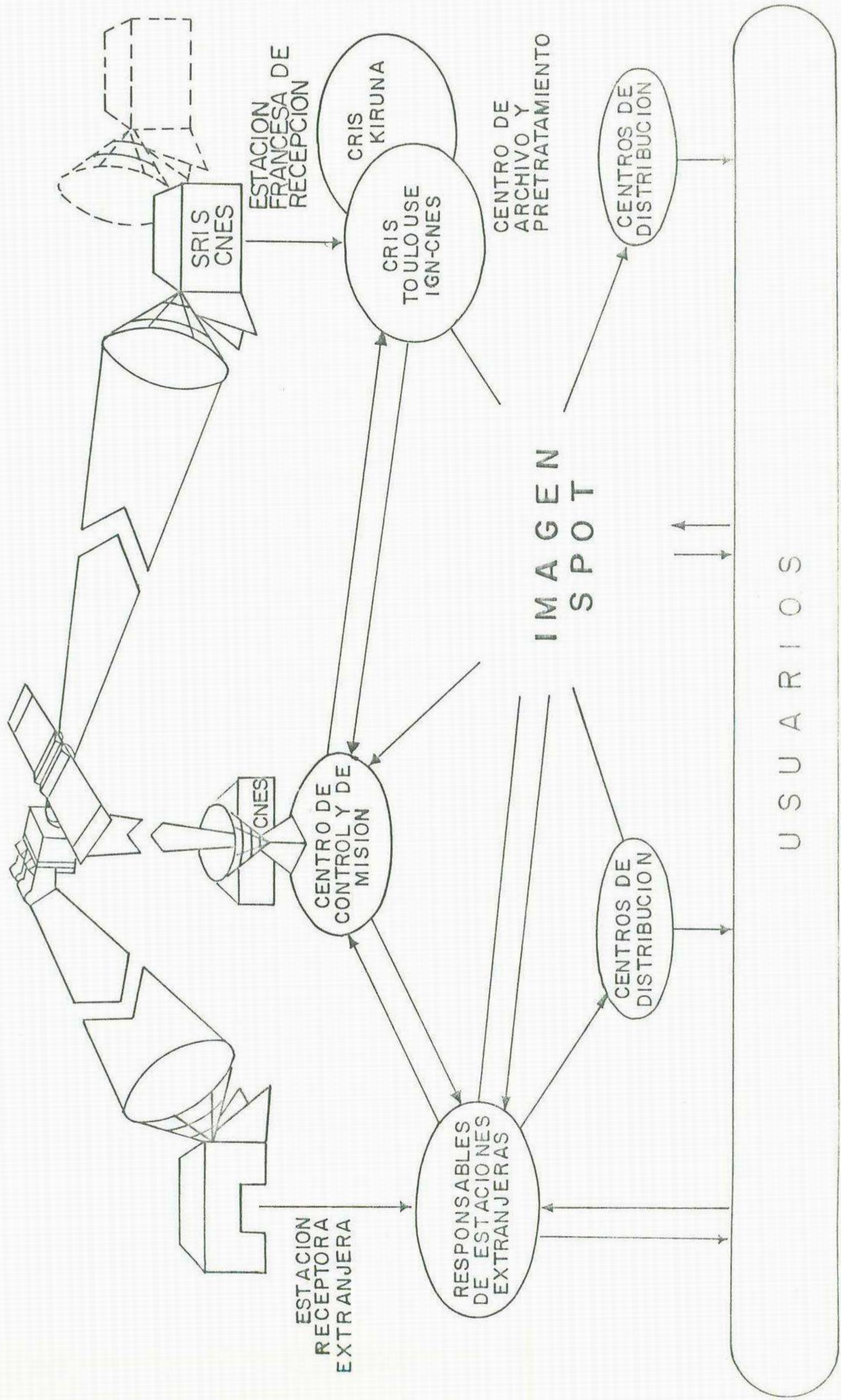


FIGURA 26. - ESTRUCTURA DEL PROGRAMA SPOT.



# COBERTURA SISTEMÁTICA DE LA TIERRA

ORBITA

SATELITE

TRAYECTORIA DE LA ORBITA

116 Km

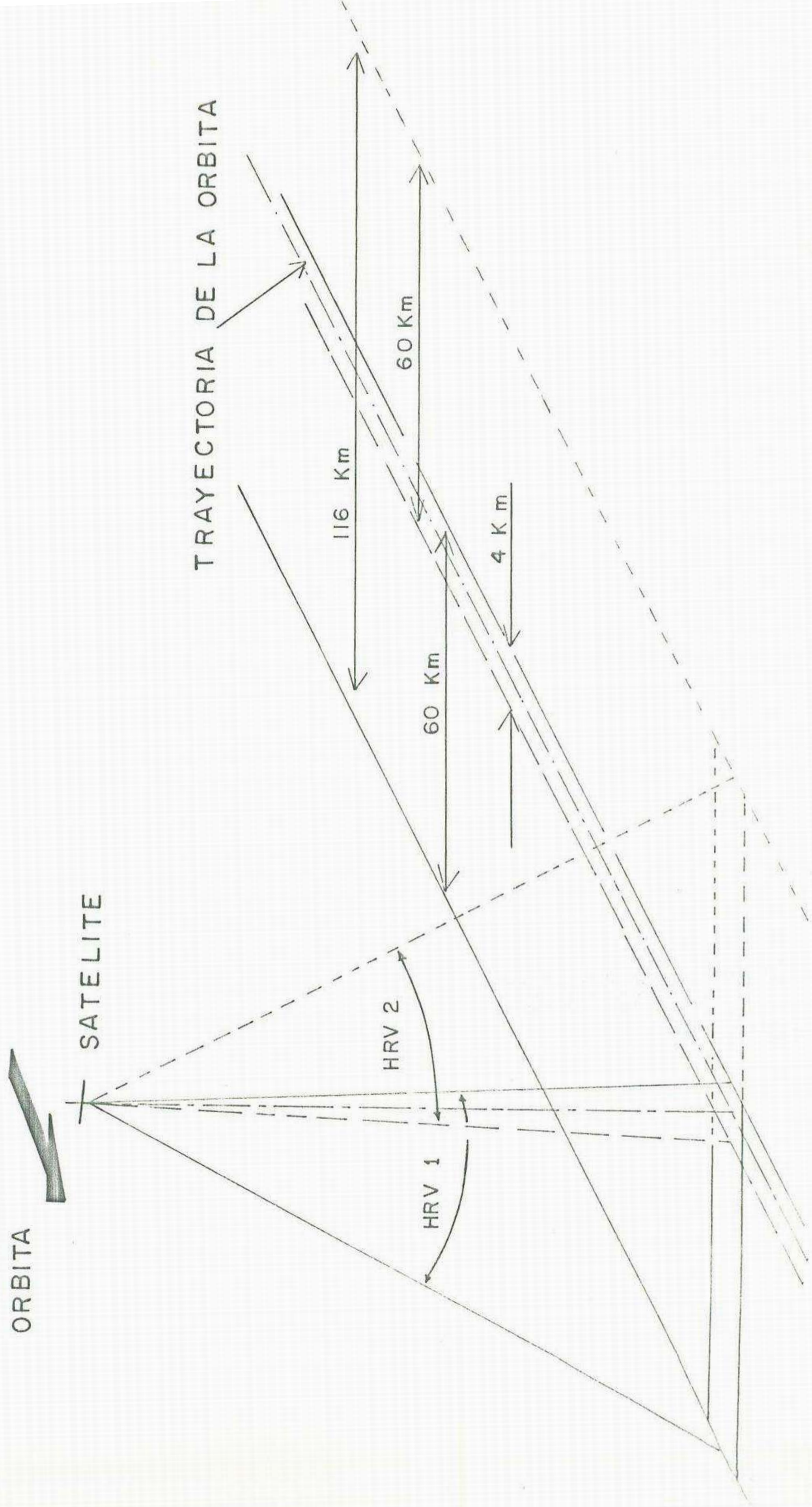
60 Km

60 Km

4 Km

HRV 2

HRV 1





# ESQUEMA FUNCIONAL DEL HRV

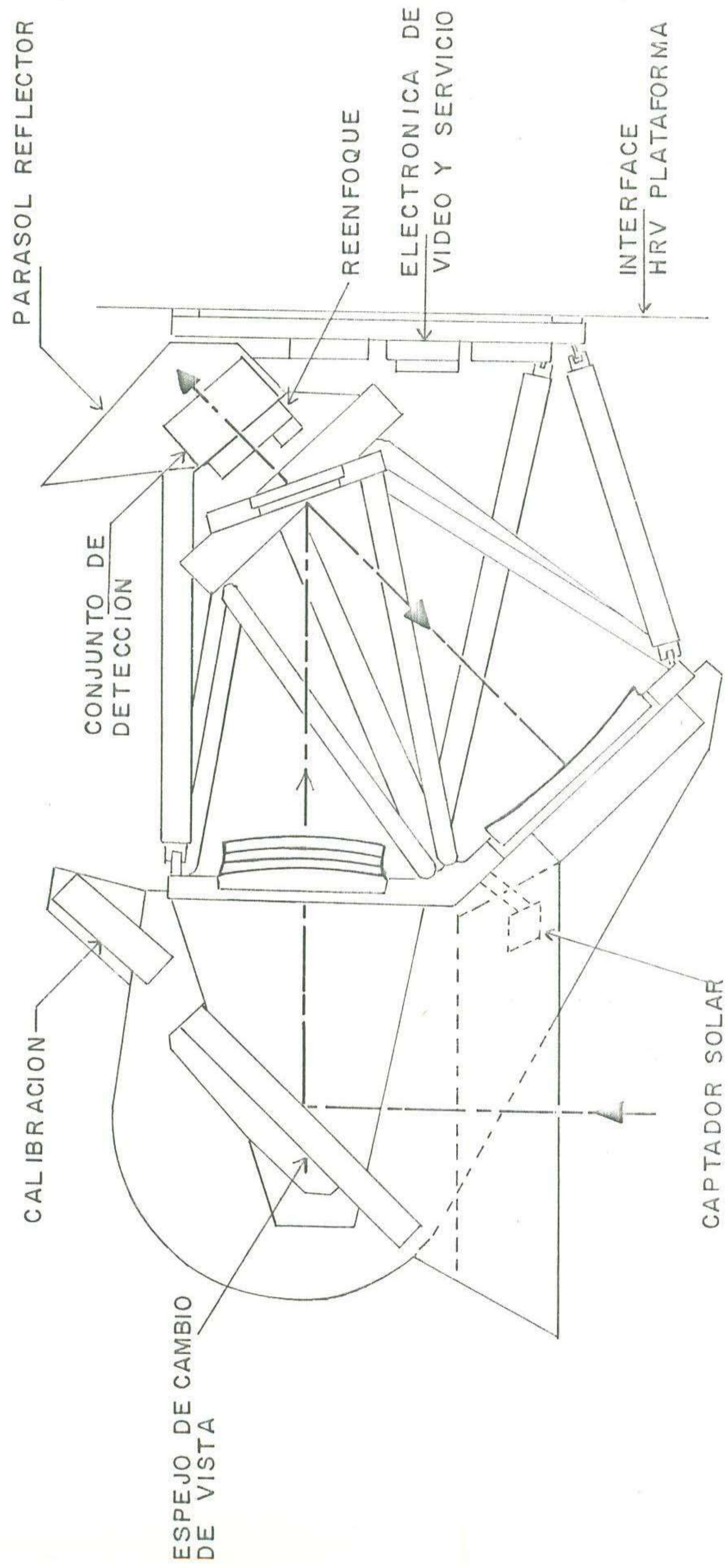


Figura 28. — CONFIGURACION DE LOS SENSORES H.R.V.



I N S T R U M E N T O    H R V  
( A L T A   R E S O L U C I O N   V I S I B L E )

• CARACTERISTICAS

	M O D O E S P E C T R A L	M O D O P A N C R O M A T I C O
RESOLUCION ESPACIAL	20 m x 20 m	10 m x 10 m
NUMERO DE PIXELS POR LINEA	3000	6000
LONGITUD DE LA ESCENA	60 a 80 Km	60 a 80 Km
LONGITUD DE ONDA	0,50 a 0,59um 0,61 a 0,69um 0,79 a 0,90um	0,50 a 0,75um
CODIFICACION DE LA INFORMACION	8 BITS LINEAL	6 BITS LINEAL

FIGURA 29.- CARACTERISTICAS DE LOS SENSORES H.R.V.



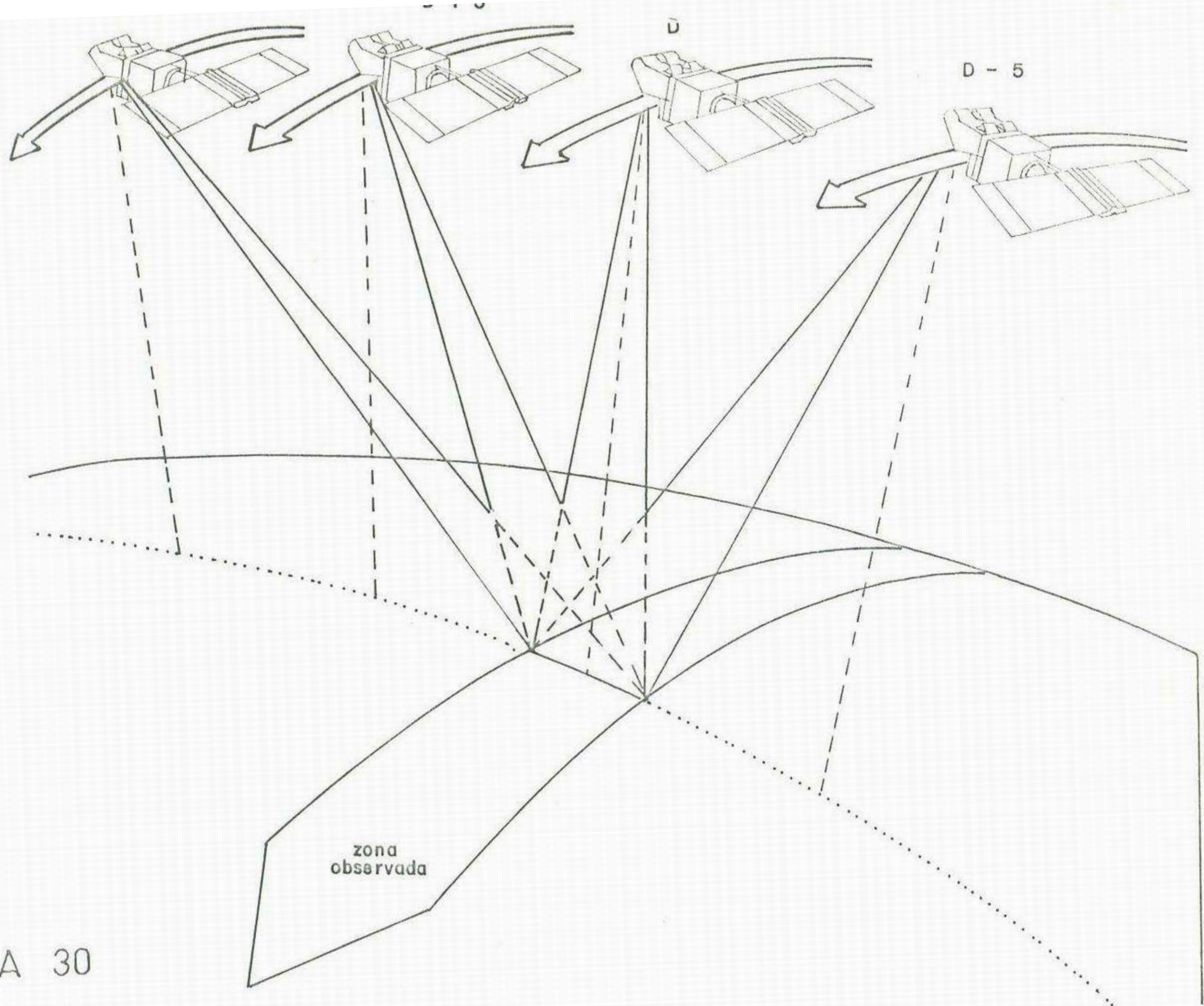


FIGURA 30

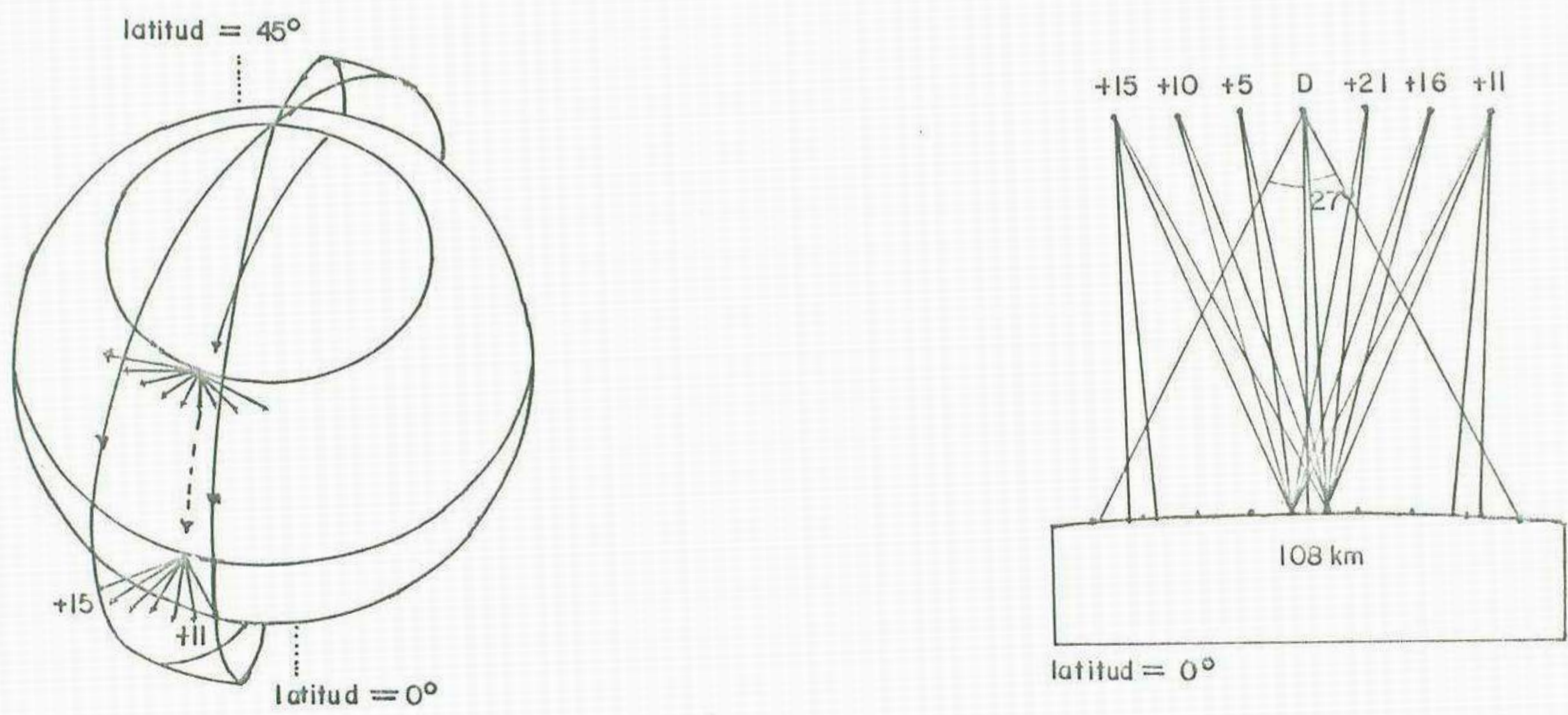


FIGURA 31

Repetitividad de las observaciones, con base en la variación de miras laterales.



XS: Modo Multiespectral

B1	:	0.50 - 0.59
B2	:	0.61 - 0.68
B3	:	0.79 - 0.89

Por lo cual, en cada una de los sistemas HRV es posible producir información pancromática y multiespectral. El espejo captor de la radiación puede orientarse, bien para observación vertical de la tierra o para visión oblicua, la orientación puede variar en más o menos 27 grados, esta propiedad le permite al sistema variar ampliamente su resolución temporal.

### 5.8.2 Órbitas y Coberturas.

La altura orbital nominal es de 850 Kms. (SPOT 1 y 2), las órbitas son heliosincrónicas, casi polares con inclinación de 98.7 grados. Para observación vertical la nave pasa cada 26 días sobre al mismo punto de la superficie terrestre, con observación lateral esta frecuencia puede aumentarse, así para latitud de cero grados es posible obtener información los días 5, 10, 15 y 21, 16, 11; para latitud de 45 grados las observaciones serían los días 5, 10, 15, 20, 25, y 21, 16, 11, 6, 1, (Fig. 31)

La estereoscopia se obtiene por observación de la misma franja del terreno desde dos órbitas diferentes (Fig. 31), con lo cual se obtiene suficiente diferencia de paralaje para la observación tridimensional.

Resumen de las características de el sistema SPOT.

	Modo	Modo
	Pancromático	Multiespectral
Resolución Espacial.	10 mts.	20 mts.







## 6. TECNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y CLASIFICACION DE IMAGENES DE SENSORES REMOTOS

### 6.1 Estructura básica de la información.

En este punto introducimos algunas definiciones basadas en los conceptos ya explicados anteriormente.

**Bit (Binary digit):** Corresponde a un elemento binario (NO-SI, Falso-Verdadero; apagado-encendido; 1=0).

**Byte:** Agrupación de 8 bits, permite representar 1 letra, o un carácter, o 2 dígitos hexadecimales (ocupando cada uno 4 bits).

**Palabra:** Agrupación de 4 bytes. Existe también la media palabra (2 bytes) y la doble palabra (8 bytes). Puede variar dependiendo de la configuración del equipo.

**Campo:** Agrupación variable de palabras que forma una unidad lógica de agrupación.

**Registro:** Agrupación variable de campos, que puede contener datos de diferentes tipos, pero relacionados entre sí.

**Archivo:** Agrupación relativamente grande de registros que conforma la información a ser procesada y que es externa al programa. Los archivos pueden ser de entrada o salida y pueden quedar almacenados antes o después de la ejecución de un proceso.

**Base de datos:** Agrupación de grandes volúmenes de información compuesta de diferentes tipos de archivos y para cuyo manejo se requiere diseños especiales de hardware y software.

### 6.2 Bits y Pixels.

El nivel (tono) de gris de cada pixel en una imagen digital



es registrado y almacenado como un número finito de bits. Usando una serie de bits podemos representar un número arbitrariamente grande dentro del límite de la longitud de palabras del computador. Las longitudes típicas de palabras son 16, 32 y 64 bits; longitudes mayores permiten mayor precisión en la representación de los números y los cálculos.

Si hay  $k$  bits/pixel, se pueden representar un total de hasta  $2^k$  niveles de gris, en un rango desde 0 hasta  $2^k - 1$ , tal como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Parámetros típicos de cuantificación radiométrica para imágenes digitalizadas.

$k$ bits/pixel	Número niveles de gris	Mínimo nivel de gris	Máximo nivel de gris
1	2	0	1
2	4	0	3
3	8	0	7
4	16	0	15
5	32	0	31
6	64	0	63
7	128	0	127
8	256	0	255

Si  $k=8$  entonces el grupo de bits que representa cada pixel es un byte, que es la unidad más común para representar datos de imágenes digitalizadas.

### 6.3 Registros y Archivos.

La característica que tienen las imágenes de estar



ordenadas espacialmente conducen naturalmente a un formato de almacenamiento de datos que preserve ese intrínseco orden. Entonces, cada línea de píxeles de la imagen usualmente es almacenada como un registro físico. Un registro es una agrupación de datos que es leída o escrita con un simple comando del programa. El conjunto total de registros que constituye una imagen es un archivo.

Las imágenes multispectrales requieren especial consideración por cuanto contienen imágenes separadas que pueden ser tratadas lógicamente como una imagen sencilla. Las imágenes son almacenadas en uno de tres formatos intercalados:

- . Banda intercalada por píxel (BIP)
- . Banda intercalada por línea (BIL)
- . Banda secuencial (BSQ)

Estos formatos se muestran diagramados en la fig. 32, y cada uno de ellos es particularmente adecuado para ciertos tipos de procesamiento. Si, por ejemplo, el procesamiento es una clasificación multispectral píxel por píxel, el formato BIP es muy conveniente porque los niveles de gris del píxel en cada banda están almacenados continuamente dentro de un registro de datos. Si el procesamiento es solamente sobre bandas individuales a partir de la imagen multispectral, entonces el formato BSQ es más conveniente porque minimiza la cantidad de datos que deben ser leídos para acceder una banda individual. El formato BIL es eficiente y conveniente para aplicaciones generales y es probablemente más ampliamente usado que los otros



BANDA INTERCALADA POR PIXEL (BIP)

registro	línea	pixel
		1 1 1 1 2 2 2 2 o o o
1	1	1 2 3 4 1 2 3 4 o o o
2	2	1 2 3 4 1 2 3 4 o o o
o	o	
o	o	
o	o	

BANDA INTERCALADA POR LINEA (BIL)

registro	línea	pixel
		1 2 3 4 5 o o o
1	1	1 1 1 1 1 o o o
2	1	2 2 2 2 2 o o o
3	1	3 3 3 3 3 o o o
4	1	4 4 4 4 4 o o o
5	2	1 1 1 1 1 o o o
o	o	
o	o	
o	o	

BANDA SECUENCIAL (BSQ)

registro	línea	pixel
		1 2 3 4 5 o o o
1	1	1 1 1 1 1 o o o
2	2	1 1 1 1 1 o o o
o	o	
o	o	
o	o	
o	o	
o	o	
o	1	2 2 2 2 2 o o o
o	2	2 2 2 2 2 o o o
o	o	
o	o	
o	o	

Figura 32



formatos.

Los archivos de imágenes que se producen para distribución general, tales como escenas de Landsat y Spot, usualmente contienen registros de encabezamiento y/o remolque (al comienzo y al final del de los archivos de imagen, respectivamente) para los datos subordinados tales como la identificación de la imagen, el número de bandas, los datos de calibración radiométrica, etc.. Estos datos generalmente son almacenados en un formato que es diferente de aquellos usados para los datos de la imagen y que es descrito en la documentación que acompaña a las cintas magnéticas que contienen los datos.

#### 6.4 Almacenamiento Magnético.

En este capítulo se describirán las bases de la manipulación numérica y análisis digital de imágenes de sensores remotos, así como el marco conceptual.

Los datos obtenidos de imágenes, generalmente provienen de un sistema de barrido que es el caso de la serie Landsat y de Spot, pero también pueden ser derivados de fotografías digitalizadas. La palabra "imagen" adquiere un significado un poco diferente en este capítulo y ya no se refiere tan solo a la familiar fotografía, impresión en papel o transparencia sino a un arreglo numérico bidimensional, en donde cada valor numérico corresponde al nivel de reflectancia de una pequeña área. Esta representación numérica de imágenes permite la aplicación de una amplia gama de algoritmos y variadas técnicas de análisis de datos.

El resultado de estos procesos de computación es un nuevo



arreglo de dígitos que representan imágenes mejoradas o clasificaciones temáticas, las cuales deben ser convertidas a su vez en representaciones analógicas para poder ser representadas en forma gráfica.

#### 6.5 Características de las Imágenes Digitales

Una imagen digital consiste de una colección de píxeles o sea de números que representan un valor asociado con cada píxel. En otras palabras, cada número corresponde a los valores de reflectancia de una área relativamente pequeña dentro de la escena.

El tamaño del área afecta la reproducción del detalle en la escena y a medida que disminuye el tamaño del píxel más detalle aparece en la imagen.

Las imágenes digitales pueden ser representadas a cualquier escala, pero el tamaño del píxel debe ser usado para controlar la escala final y para tener una imagen de buena calidad se recomienda que en la reproducción final del tamaño del píxel no se pueda diferenciar a la distancia normal de observación. Sin embargo, para mapas y clasificaciones siempre es deseable usar escalas mayores donde pueda describirse a nivel de píxel.

Tratándose de imágenes de satélite estamos mirando la superficie de la tierra a través de la atmósfera y en consecuencia el sensor no solo mide la radiación reflejada por la superficie sino también parte de la radiación dispersada por la atmósfera.

En la imagen el valor asociado con cada píxel representa la totalidad de la radiación que llega al sensor. Pero



afortunadamente los efectos atmosféricos son (casi) constantes en grandes extensiones y los cambios de radiación detectados por el sensor se deben a los cambios en el terreno.

#### 6.6 Parámetros de un Pixel.

El área representada por un pixel está determinada por la altura del sistema del sensor y por los parámetros de diseño, particularmente por el campo instantáneo de vista o célula de resolución terrestre.

Existen muchos métodos de barrido para mover el campo de vista instantáneo a través del terreno, todos los cuales resultan en el registro continuo de la radiación de la escena en forma bidimensional de pixels que luego constituye la imagen digital.

La distancia entre dos mediciones consecutivas de radiación dentro del campo instantáneo de vista está determinada por la frecuencia del muestreo y puede, o no, ser igual campo de vista instantáneo. Normalmente nos referimos al muestreo como el tamaño del pixel. En el caso particular de Landsat MSS el muestreo se hace cada 57 metros resultando así una mejor reproducción del detalle del terreno.

Con todos los datos en forma digital, se usa un número finito de bits para representar la radiación de cada pixel en la escena en forma binaria. La radiación de la escena es entonces cuantificada en discretos niveles de gris.

Sólo se requieren 5 o 6 bits por pixel (que representan 32 o 64 niveles) para lograr en forma visual la continuidad de la imagen cuando ésta se muestra en un dispositivo de salida. Sin



embargo, cuando se hace análisis numérico lo aconsejable son más bits por pixel. El MSS Landsat tiene 6 bits por pixel pero el Mapeador Temático tiene 8 bits por pixel resultando así 256 niveles de gris. Los tonos de gris aumentan y en consecuencia se mejora la apariencia visual de la imagen.

Un pixel se caracteriza por:

1. La dimensión lineal del campo de vista instantáneo del sensor proyectado al terreno.
2. La distancia entre dos muestras.
3. El número de bits que representa la reflectancia.

Estos parámetros dan la resolución ideal desde el punto de vista espacial y radiométrica o espectral de la imagen final. Sin embargo muchos otros factores afectan la resolución real de la imagen. Por ejemplo, la resolución espacial depende no solo de los muestreos sino también de los movimientos así como las características electrónicas del sistema y el equipo de transmisión.

#### 6.7 Parámetros de una Imagen.

El campo de vista del sensor determina el Área del terreno cubierta por una imagen y junto con la distancia entre muestreos determina el número total de pixels de la imagen. El número de pixels por escena es del orden de decenas de millones y por eso se deben de hacer ciertas consideraciones sobre la adquisición y manipulación de la información. Lo aconsejable es manejar esta información con computadores.



El contraste se puede definir de dos formas:

$$1. \quad C = \frac{N_{MAX} - N_{MIN}}{N_{MAX} + N_{MIN}}$$

Donde  $N$  = Niveles de gris

$C$  = Contraste

$$2. \quad C = \frac{N}{\sigma}$$

Donde  $N$  = Desviación estándar de niveles de gris.

El contraste es una importante propiedad de las imágenes por varias razones:

a) La definición numérica puede ser usada para medir la relación señal-ruido de la imagen digital. En una imagen contaminada por un ruido al azar, pero uniforme, la relación señal-ruido será definida por  $C$ .

2

b) El contraste es un indicador visual de la calidad de la imagen y en la imagen numérica es el valor de la reflectancia.

Una medida relacionada con el contraste es la modulación.

$$M = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}}$$

Siendo que los niveles de gris son siempre positivos, la modulación resulta con valores entre 0 y 1.



Otra forma de medir la modulación es :

$$M = \frac{C}{1 - 1} - \frac{C}{1 + 1}$$

La modulación es un valor que se puede medir y modificar en el análisis digital de las imágenes.

#### 4.8 Diferencias entre Procesamiento Digital de Imágenes y Clasificación.

El procesamiento digital es la manipulación numérica de imágenes e incluye preproceso, mejoramiento y clasificación.

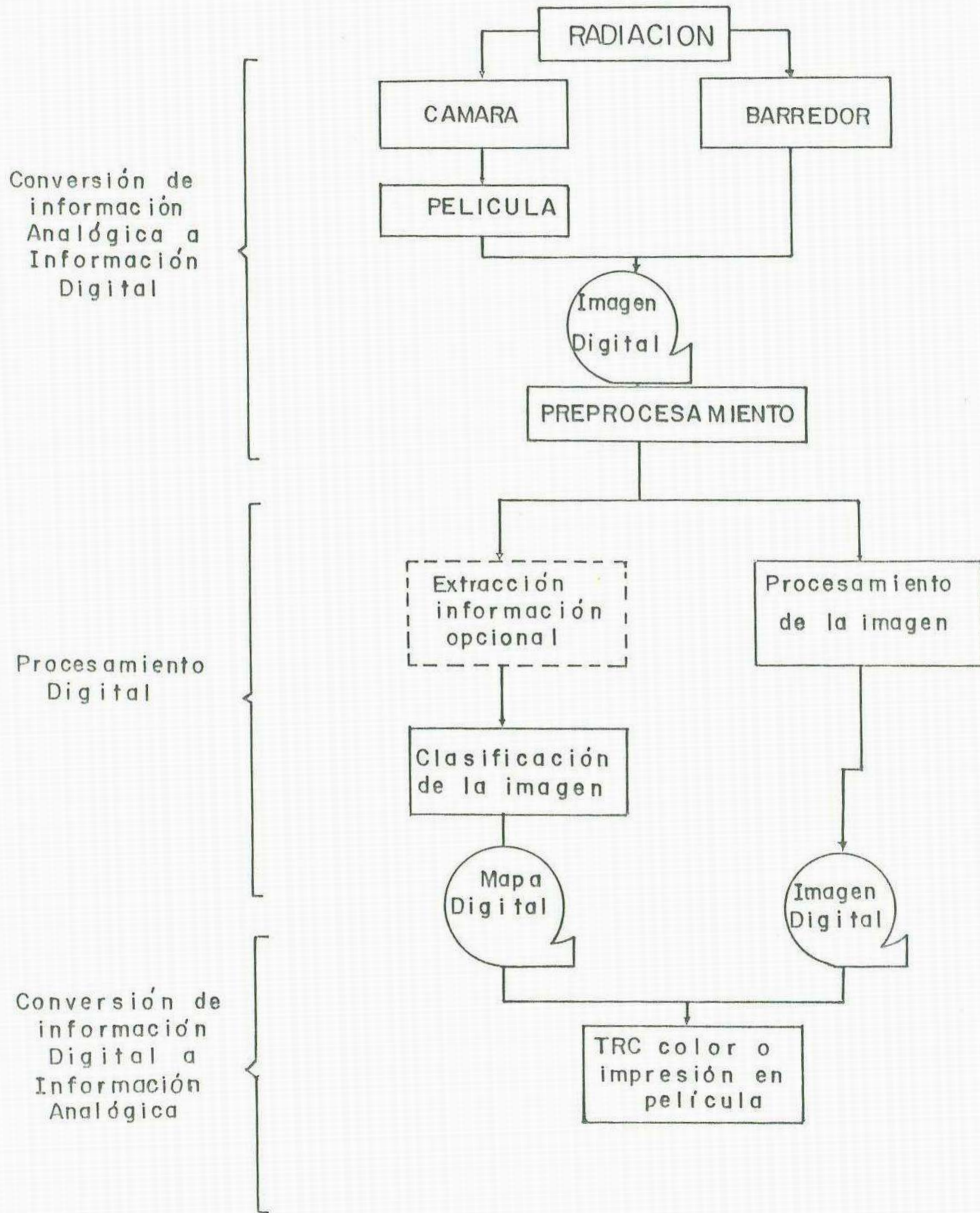
Preproceso se refiere al procesamiento inicial de los datos originales, el cual se hace para corregir los errores radiométricos y algunas distorsiones geométricas así como para eliminar un poco el ruido. El tipo de preproceso necesario depende de las características del sensor. Fig. 33

El mejoramiento o realce de la imagen produce una nueva imagen que es mostrada en pantalla por ejemplo, para la interpretación visual. Se supone que la imagen mejorada es superior para su interpretación. En el mejoramiento de las imágenes se puede emplear artificios que hacen evidentes detalles no identificables en la imagen original.

La clasificación de las imágenes es un paso más en el análisis digital y trata de la interpretación de la imagen tomando decisiones en forma cuantitativa y el producto final es un mapa temático en el cual cada uno de los pixels originales ha sido clasificada dentro de un tema de clase .



FIGURA 33 - ETAPAS DEL PROCESO NUMERICO DE UNA IMAGEN DE SENSORES REMOTOS.





A pesar de que se pretenda hacer el proceso más objetivo el aporte del especialista es definitivo para el éxito de una clasificación.

Aunque el preprocesado, mejoramiento y clasificación se pueden considerar en algunos casos distintos tópicos existen muchas relaciones entre ellos, por ejemplo, técnicas de preprocesado como eliminación de ruidos, pueden en algunos casos ser consideradas técnicas de mejoramiento de imágenes como para mejorar clasificaciones multispectrales.

Debido a la similitud entre muchos de estos términos se usará el término "Procesamiento digital de imágenes" para las fases de preprocesado y mejoramiento y el término "Clasificación" será usado sólo cuando la técnica usada conduzca a la producción de un mapa temático.

#### 6.9 Procesamiento Digital.

El procesamiento digital de imágenes de sensores remotos empezó a ser importante con el lanzamiento del Landsat a comienzos de la década de los setentas, Fig. 33.

Conociendo de antemano que el procesamiento digital de las imágenes no se puede comparar en velocidad al proceso óptico, se acepta que el procesamiento digital es la forma lógica para manejar las grandes cantidades de datos que generan los sensores remotos especialmente los ubicados en satélites.

Entre las razones más importantes figuran:

- 1.- Procesamiento digital de datos, que originalmente se adquieren en forma digital, presentan el mayor potencial para



conservar la radiometría y la máxima resolución de las imágenes.

2.- El procesamiento digital es más flexible que el procesamiento óptico (visual). Sin embargo, esta flexibilidad está limitada y todo depende del tiempo de computación disponible (costo) y exactitud esperada.

3.- La posibilidad de mejorar (alterar) las imágenes para facilitar la interpretación a través del mejoramiento de contraste o realce de ciertos rasgos.

4.- La compresión de datos multispectrales y multitemporales y la posibilidad de clasificar en forma automática la información.

5.- La facilidad de tener computadores a disposición permite a los investigadores realizar procesamiento y análisis en forma simultánea a la adquisición.

Las técnicas de análisis digital se pueden dividir básicamente en dos grupos:

a. Corrección de errores sistemáticos y calibración de la imagen.

A esta fase se le llama preproceso o restauración y requiere de operaciones relativamente simples y repetitivas pero manejando un gran volumen de datos.

También se considera aquí el mejoramiento de la imagen o sea una serie de operaciones y procesos diseñados para mejorar la calidad de la imagen y facilitar su interpretación.

b. La segunda parte es la extracción de la información lo cual requiere máxima flexibilidad y un enfoque orientado hacia un tema.



#### 4.9.1 Restauración de Imágenes.

Se refiere a la corrección de las distorsiones, degradaciones y ruido que se produce en la formación de imágenes digitales.

El problema concreto de la restauración de imágenes es producir una imagen correcta a partir de una imagen grabada con ciertos errores. La nueva imagen debe ser lo más cercana posible al objeto original tanto desde el punto de vista geométrico como radiométrico.

De acuerdo con el tipo de distorsión, se pueden aplicar diferentes procesos. Veamos algo sobre los errores más frecuentes y el procedimiento empleado para minimizarlos.

##### 1.- Errores Radiométricos.

###### a) Falta de una línea.

El mal funcionamiento de un detector (caso del barrador multiespectral) puede resultar en que la línea de barrido aparezca con valores muy bajos o nulos, es decir que el sensor no capte información apareciendo en la imagen visual como una línea negra. La corrección a este error se logra sustituyendo por valor promedio de los pixeles correspondientes a la línea anterior y posterior a la línea problema.

###### b) Efectos atmosféricos.

Los efectos atmosféricos, en imágenes de sensores remotos, son debidos especialmente a la atenuación que sufre la radiación en la atmósfera y la dispersión de dicha radiación. La dispersión es el error más grave; es claro que la dispersión guarda una relación con la longitud de onda. Entre más pequeña la



longitud de onda mayor será la dispersión. Esa es la razón por la que en imágenes multispectrales las correspondientes al azul y el verde presentan menos contraste que las imágenes correspondientes a las longitudes de onda infrarrojas.

Para corregir este defecto el método más sencillo consiste en comparar píxeles idénticos en todas las bandas. Por ejemplo, píxeles correspondientes a sombras o agua clara donde los valores de reflectancia son muy bajos (valores cercanos a cero) en todas las longitudes de onda (visible e infrarroja).

Cuando en las bandas de longitudes de onda más corta tienen valores relativamente altos esto se debe a la dispersión la cual causa cierta iluminación. En ese caso se restan estos valores de todos los píxeles de la imagen. Los errores de distorsión también pueden ser corregidos usando métodos un poco más sofisticados basándose en estadística siendo uno de los más usados el de comparación de histogramas.

### c) Ruidos.

Se denomina ruido a cualquier señal no deseada dentro de una imagen. El ejemplo más común de ruido es la granulosidad fotográfica.

En imágenes de sensores remotos hay varios tipos de ruidos, entre otros: ruido al azar, ruido aislado, ruido periódico y estacionario, ruido periódico pero no estacionario.

El ruido al azar se caracteriza por variaciones estadísticas de los niveles de gris pixel por pixel. Este ruido puede ser originado en la atmósfera o en los componentes electrónicos del sistema. Este tipo de ruido es independiente de la señal. La



forma más aconsejable para eliminarlo es aplicar un filtro de paso bajo.

El ruido periódico es relativamente fácil de corregir, pero el ruido al azar es considerablemente más complejo aunque a veces, teniendo las características del sensor, es posible tener una aproximación del ruido esperado.

Se aconseja hacer un análisis cuidadoso de la estructura del ruido antes de aplicarle el algoritmo de "eliminación de ruido".

## 2. Distorsiones Geométricas.

Se pueden clasificar en distorsiones sistemáticas o inherentes al sistema y en NO sistemáticas es decir causadas por problemas de funcionamiento del sistema. Fig. 34.

### a) Distorsión por rotación de la tierra.

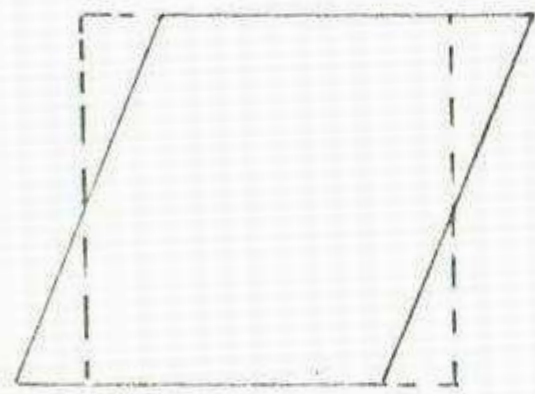
Esta distorsión se presenta porque la mayoría de las imágenes de sensores remotos (excepto la fotografía) son registradas en forma continua y en el lapso de tiempo durante el cual se forma la imagen la tierra se ha desplazado debido a su rotación.

Esta es una distorsión geométrica sistemática pero no es constante ya que el desplazamiento depende de la latitud (a menor latitud mayor desplazamiento). Por ejemplo, las imágenes Landsat deben ser corregidas y por esta razón tienen forma de paralelogramo. Esta corrección se hace aplicando algoritmos que logren desplazar grupos de píxeles hacia la dirección deseada.

### b) Distorsión panorámica.

Cuando el intervalo de tiempo de muestreo de la señal

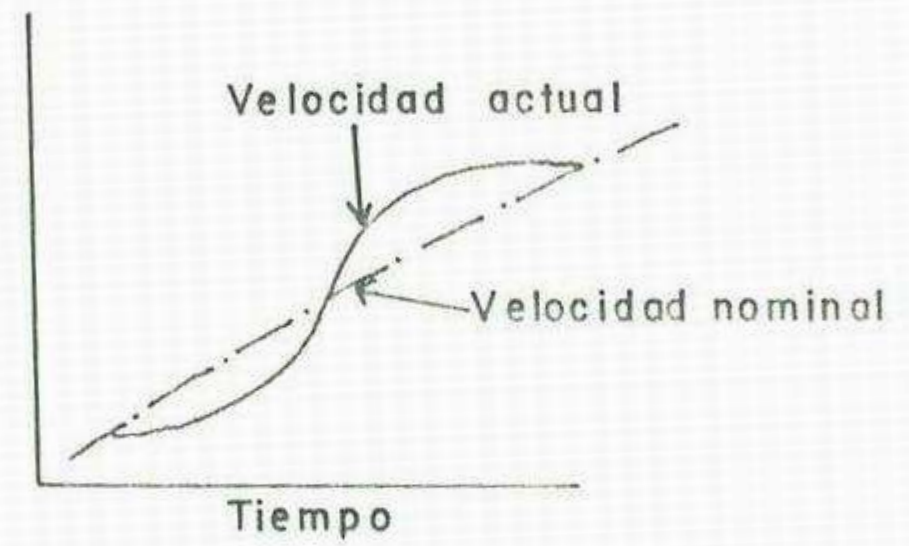




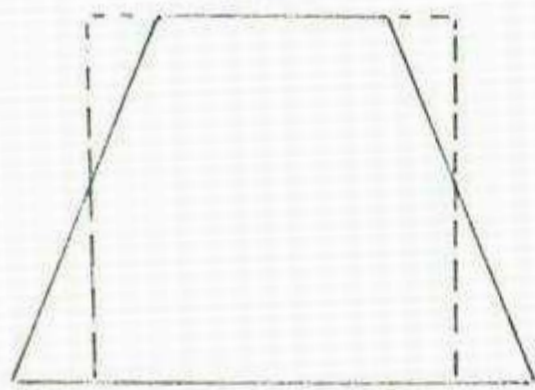
a) Rotación de la tierra



b) Panorámica



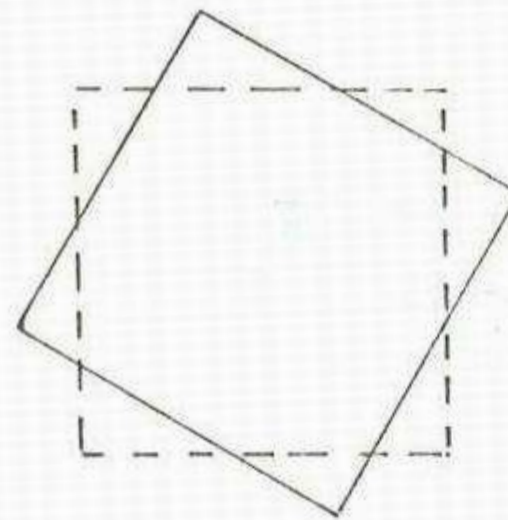
c) Variaciones en la velocidad del espejo



d) Variación en altitud.



e) Variación en velocidad



f) Variación por giro

Figura 34.- Distorciones Geométricas



corresponde en el terreno a una distancia inferior al campo de vista instantáneo, la imagen presenta compresión, es el caso del sistema Landsat MSS cuyo campo instantáneo de vista es de 79 mts. y la distancia de muestreo (ancho del pixel) es de 57 mts.

Este tipo de distorsión se corrige sólo cuando se tiene control terrestre adecuado y se hace a través del llamado algoritmo de expansión.

c) Distorsiones geométricas no sistemáticas.

Son debidas a variaciones imprevistas en velocidad, altitud y orientación de la plataforma (avión, satélite, etc.). Generalmente produce compresión o expansión de la imagen. Para corregir estas distorsiones es necesario el control terrestre para hacer la transformación de coordenadas. Existen en el mercado algoritmos para la transformación de coordenadas. Una de las técnicas más conocidas es la del remuestreo que se puede efectuar por cualquiera de los siguientes métodos:

- El vecino más cercano.
- Interpolación bilinear.
- Interpolación bicúbica (convolución cúbica).

En general las transformaciones geométricas pueden ser tratadas de dos maneras:

- Se cambia la localización del pixel pero este retiene su valor de intensidad.
- La imagen es remuestreada y en ese caso cambia la localización del pixel y el valor de la intensidad está dado por la interpolación de los valores de los pixels vecinos.



### 6.9.2 Mejoramiento de imágenes.

Al procesamiento numérico empleado para mejorar, enfatizar o suprimir ciertas características de la imagen, de le llama realce de la imagen. En este procesamiento se incluye el mejoramiento del contraste entre objetos, énfasis en límite entre los diferentes tipos de cobertura terrestre y también sirve para suprimir características no deseadas en la imagen.

Se han desarrollado varias técnicas que se pueden clasificar en operaciones puntuales es decir el valor de reflectancia de cada pixel es modificado en forma independiente y en operaciones locales cuando se modifica el valor de cada pixel, teniendo en cuenta los pixels vecinos.

Entre los métodos más conocidos figuran:

- 1). Ecuilización del histograma.
- 2). Mejoramiento de contraste.
- 3). Filtros espaciales.
- 4). Definición de límites.

- 1). Ecuilización del histograma.

La transformación lineal simple se usa rutinariamente para mejorar el contraste de una imagen, presentada en un dispositivo gráfico, expandiendo el rango de los niveles de gris para llenar el rango dinámico del dispositivo de salida. Para conseguir un mayor incremento en el contraste, normalmente se acepta alguna saturación en los extremos del rango de salida, para lo cual se han desarrollado varios algoritmos o procedimientos de transformación.



Un tipo general de estas transformaciones es el que se conoce como "Ecuación del histograma", el cual es bastante útil para ampliar la variedad de imágenes. A partir del histograma original y utilizando la frecuencia acumulada (ojiva) como la función de transformación, y luego de cambiar adecuadamente la escala del eje de la ordenada que corresponde a los niveles de gris para la salida, el histograma de la imagen procesada será aproximadamente uniforme. La ecualización del histograma pretende reducir automáticamente el contraste en áreas muy claras o muy oscuras y expandir los niveles de gris intermedios hacia los extremos alto y bajo de la escala de reflectancia en razón de que la mayoría de los histogramas tienen una forma Gaussiana. Es decir, que a partir del histograma original de entrada, seguramente asimétrico, se busca obtener un histograma de salida en el cual la "participación" (frecuencia) de cada uno de los tonos de gris sea similar.

La frecuencia "ideal" para cada uno de los niveles de gris de salida será:

$$f_s = 100 \% / n_g$$

en donde:

$f_s$ : Frecuencia relativa de salida

$n_g$ : Número de niveles de gris (depende de las posibilidades del dispositivo de salida).

Por ejemplo, si una impresora sobre papel en blanco y negro permite obtener 12 niveles de gris o tonos de gris diferentes, entonces la frecuencia relativa de salida para cada uno de ellos



será:

$$fs=100 \% / 12$$

$$=8.33 \%$$

A partir de este valor se pueden obtener los correspondientes a cada nivel de intensidad.

0, 8.33, 16.67, 25, 33.33, 41.67, 50, 58.33, 66.67, 75, 83.33, 91.67, 100.

Sin embargo, es casi imposible lograr una transformación constante para toda la imagen. Lo usual es que se presenten ligeras variaciones entre las frecuencias relativas correspondientes a distintos niveles de gris.

Adicionalmente puede lograrse una implementación que no sea "global", es decir, que a todos los pixels de la imagen no se les aplique la misma ampliación del contraste. Obviamente, el contraste puede variar localmente dentro de una imagen y, en consecuencia, se puede lograr un resultado mejor si se usa un algoritmo adaptivo cuyos parámetros cambien de pixel a pixel de acuerdo con el contraste local de la imagen, para lo cual esta última puede ser dividida en subimágenes.

## 2). Mejoramiento del contraste.

La manipulación del contraste es una transformación de pixel por pixel. Cada nivel de gris es cambiado por una transformación específica, este tipo de mejoras a la imagen son muy útiles para hacer interpretación (clasificación) en forma visual, pero si clasificación se va a hacer por computador se deben evitar estas transformaciones porque ellas modifican los verdaderos valores de



los pixels. Este tipo de transformación solo se debe de hacer si se conoce con certeza su utilidad.

### 3). Filtros espaciales.

Al igual que el mejoramiento del contraste, en los filtros espaciales se realizan operaciones pixel por pixel pero la transformación en este caso no solo depende del nivel de gris de los pixels que se van a procesar sino también de los niveles de gris de los pixels vecinos. Es por eso que se dice que los filtros espaciales transforman el valor de un pixel teniendo en cuenta los valores de los pixels vecinos.

Los filtros espaciales se han clasificado en tres tipos:

- De paso bajo.
- De paso alto.
- Filtro de banda.

```
-1   -1   -1
-1   -16  -1
-1   -1   -1
```

Ejemplo de un filtro de paso bajo.

Estos tres tipos de filtros pueden ser combinados de varias maneras, llegando a formar filtros complejos.

Los filtros de banda en su forma pura no tienen otra aplicación que la de eliminar los ruidos periódicos en las imágenes.

El efecto de un filtro bajo es suavizar o reducir niveles de gris y en consecuencia hacer más armónico el contraste, aunque se



pierde resolución espacial pero se mejora la textura de la imagen mejorando así la posibilidad de interpretación.

Un filtro de paso alto se usa para realzar el contraste. Este filtro consiste en adicionar valores a la imagen original dándole un peso adecuado para mejorar así la definición de contornos, lineamientos, etc..

#### 4). Definición de límites.

Un clásico problema que se encuentra cuando se procesa una imagen es la detección de cambios bruscos en los niveles de gris de un pixel a otro. Estos cambios generalmente están asociados con límites, por ejemplo, entre dos clases. Este problema ha sido estudiado ampliamente por los especialistas siendo una de las formas más convenientes para desarrollarlo el método expuesto por Davis (1975) que consiste en aplicarle a la imagen un filtro de paso alto.

Como los filtros generalmente tienen una dirección (horizontal, vertical, inclinada, etc..) y se puede resaltar límites en todas las direcciones.

El siguiente ejemplo es un filtro de paso alto en la dirección S-E.

$$\begin{array}{ccc} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 4 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{array}$$

La detección de límites en imágenes digitales es una operación binaria. A veces después de haber aplicado un filtro



para mejorar los límites, se encuentra con líneas fragmentadas, carreteras por ejemplo, presentadas como segmentos. Esto significa que el filtro fue demasiado alto y entonces se aconseja usar otras técnicas como algoritmos de adelgazamiento de líneas o corrección de líneas que solucionan estos problemas.

### 6.9.3 Clasificación de Imágenes.

Clasificación es un concepto del procesamiento digital de imágenes que contempla los procedimientos mediante los cuales un computador puede agrupar los pixels de una imagen de acuerdo a categorías o clases.

Normalmente se pueden agrupar los clasificadores según sus características en :

- 1). De textura.
- 2). Multiespectrales.
- 3). Temporales.

#### 1). Clasificadores de textura.

Se aplica a imágenes provenientes de sensores activos como radar, el cual no puede captar respuestas espectrales.

En este tipo de clasificación se utilizan algoritmos que analizan los pixels y los agrupan según características del terreno como rugosidad o morfología.

#### 2). Clasificadores multiespectrales.

Son aplicados a imágenes que cuentan con respuestas multiespectrales. El principio consiste en separar los pixels dentro de un espacio multiespectral.



La clasificación multispectral de los datos incluye la determinación de un criterio de decisión que pueda usar un computador para asignar a un objeto determinado una clase específica con base en reglas de clasificación.

Existen dos enfoques principales para la determinación de las características espectrales de todos los tipos de coberturas del terreno en los cuales se clasifican los datos y estos son el método supervisado.

**Clasificación supervisada:** Es el método de clasificación usado cuando la identificación y localización de algunos tipos de cobertura (urbana, agrícola, bosque, etc..) se conocen a priori bien a través de chequeos de campo, apoyados en interpretación de otras imágenes (fotografías aéreas) mapas y/o experiencias personales.

El interprete intenta localizar en las imágenes datos que representan zonas homogéneas desde el punto de vista de cobertura. Estas áreas se llaman comúnmente sitios de entrenamiento en razón de que las características espectrales de dichas áreas son usadas para entrenar el algoritmo de clasificación.

El computador calcula los parámetros estadísticos de cada sitio de entrenamiento y luego toma cada pixel de la imagen lo evalúa, compara y le asigna la respectiva clase. (se explicará en el capítulo 7mo.).

**Clasificación no supervisada:** En este método los tipos de cobertura no se conocen bien porque falta trabajo de campo o porque las características espectrales de la superficie no



están claramente definidas en la imagen. El computador es orientado para que agrupe (cluster) los pixels en diferentes clases de acuerdo con un cierto criterio estadístico. En este enfoque los parámetros estadísticos que determinan las clases de entrenamiento se determinan mediante la selección de campos heterogéneos que contienen tantas relaciones espectrales diferentes como sean posibles y entonces se usa un algoritmo aglutinante para agrupar automáticamente los pixels de características espectrales similares en número de clases de grupos separables espectralmente. No se requiere conocer a priori la identidad del agrupamiento (entrenamiento) y quizás una de las características más importantes de este método es que no solo determina los tipos de cobertura pura del terreno, en una zona, sino también las clases mezcladas que se presentan usualmente en un grupo de datos Landsat. Por consiguiente, se obtiene una representación más cercana de los agrupamientos espectrales naturales de una zona mediante el enfoque no supervisado.

Aún cuando la clasificación multispectral real de datos de sensores remotos involucren un gran número de operaciones, los conceptos fundamentales y los pasos esenciales se pueden considerar en:

- Presentación pictórica de los datos sin analizar.
- Definición de clases espectrales (entrenamiento).
- Clasificación de toda el área de estudio.
- Representación pictórica y tabular de la clasificación resultante.
- Evaluación de los resultados de la clasificación.



a).- Presentación pictórica de los datos sin analizar.

Como los datos se graban usualmente en una cinta magnética el primer paso de una clasificación multiespectral involucra la representación de estos datos en una forma pictórica para su inspección visual. Esto se puede lograr mediante el uso de un instrumento de tipo de rayos catódicos o de una impresora.

Los datos en forma pictórica se usan entre otros objetivos para :

- Valorar la calidad de los datos.

- Determinar la cantidad y distribución de nubes.

- Delinear las áreas de interés para estudio detallado (seleccionar ventanas).

- Seleccionar muestras representativas dentro de una área de interés para determinar las clases espectrales (áreas de entrenamiento) que se usarán en el entrenamiento del clasificador.

La parte más importante y crítica es este paso es la de asegurarse que todos los objetos posibles que se encuentran en la zona están debidamente representados en la muestra para entrenamiento.

b).- Definición de las clases espectrales (entrenamiento).

El proceso de instruir al computador cómo y en que circunstancias tomar ciertas decisiones se conoce como "entrenamiento".

En el caso particular de la clasificación de datos multiespectrales percibidos remotamente, al computador debe



proporcionársela las características de un número de clases espectrales que le permita decidir si un pixel se debe clasificar en una clase de adiestramiento.

En la práctica, las características espectrales de los tipos de cobertura terrestre, se determinan usualmente mediante simples parámetros estadísticos, como las medianas y covarianzas de distribuciones normales de la firma espectral de cada una de las clases de adiestramiento.

La fig. 35 muestra la reflectividad en un espacio bidimensional (banda 2 y 3 de Landsat MSS) de un gran número de pixels que corresponden a tres tipos básicos de cobertura, y los cuales se agrupan entre ellos. El algoritmo de agrupamiento ubica estos grupos y computa sus parámetros estadísticos característicos que luego se usan para entrenar el computador.

El concepto de separabilidad espectral (Swain and Davis, 1978) es muy importante cuando se hacen clasificaciones multiespectrales. Existen varios criterios complejos para la medición de la separabilidad espectral entre las clases de adiestramiento. Sin embargo, el concepto fundamental que subraya las mediciones de separabilidad espectral, que se usa más comúnmente es bien simple. La fig. 36 muestra gráficamente la relación entre una medida de separabilidad espectral y los parámetros estadísticos que definen una clase de entrenamiento espectral. Observe que la separabilidad espectral es proporcional a la distancia entre la media de dos distribuciones de clase de adiestramiento e inversamente proporcional a la suma de sus desviaciones normales.

Se han desarrollado técnicas efectivas para determinar las



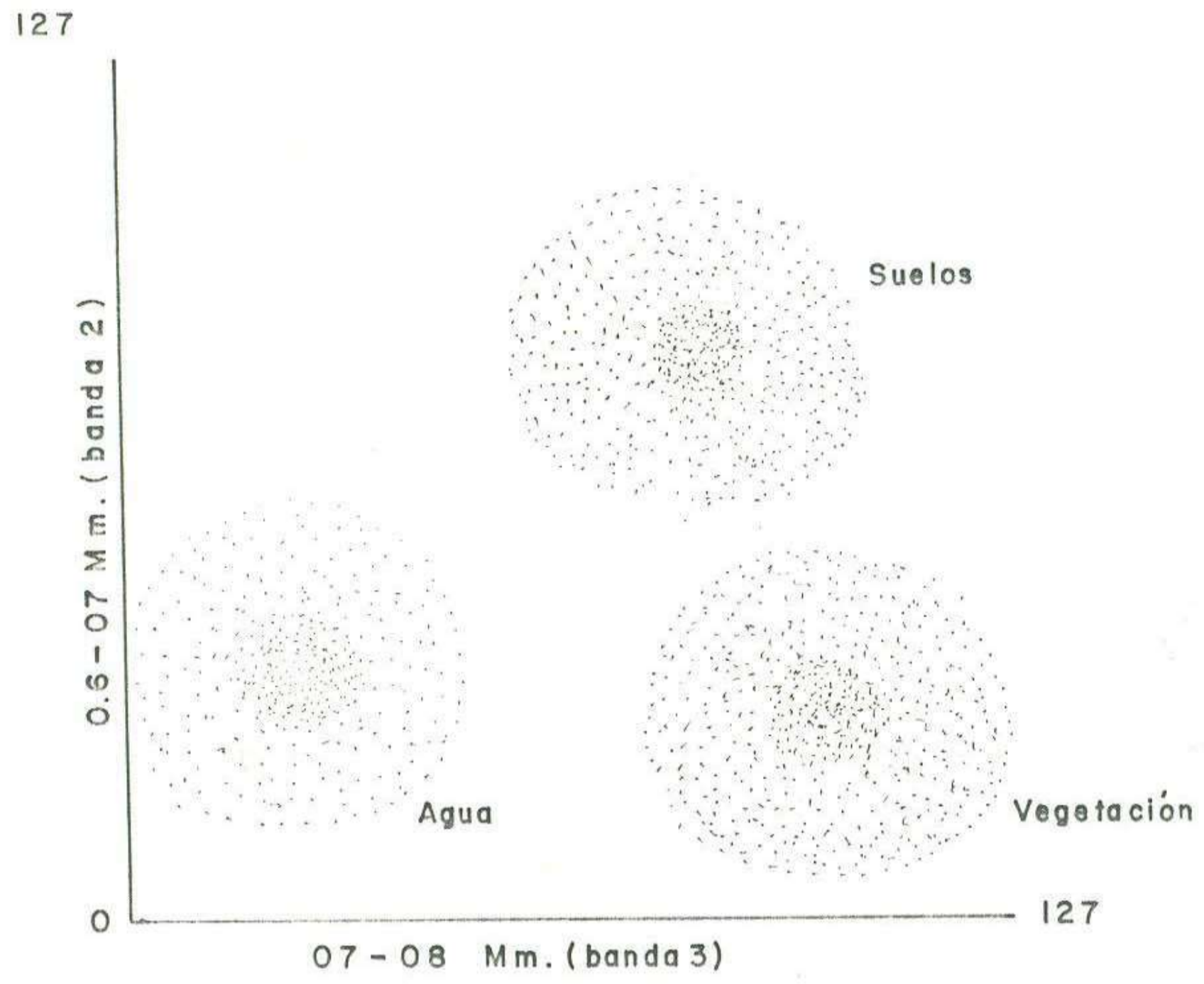
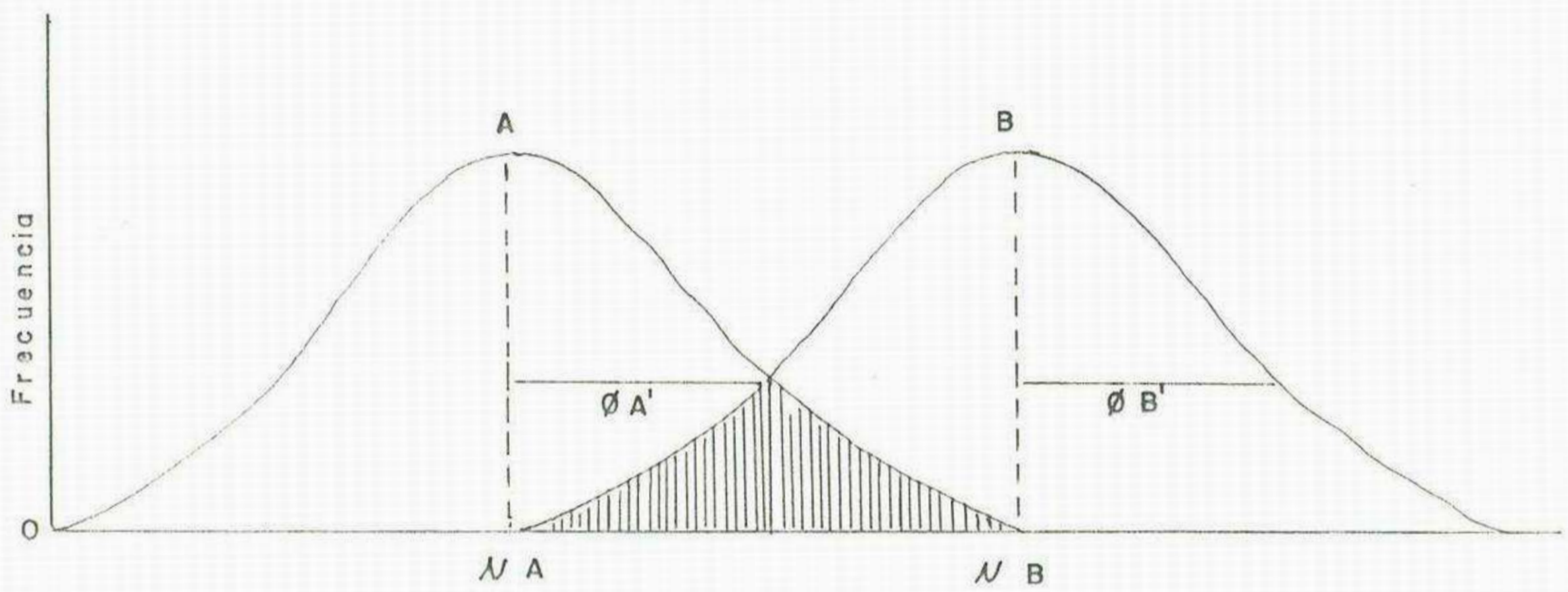
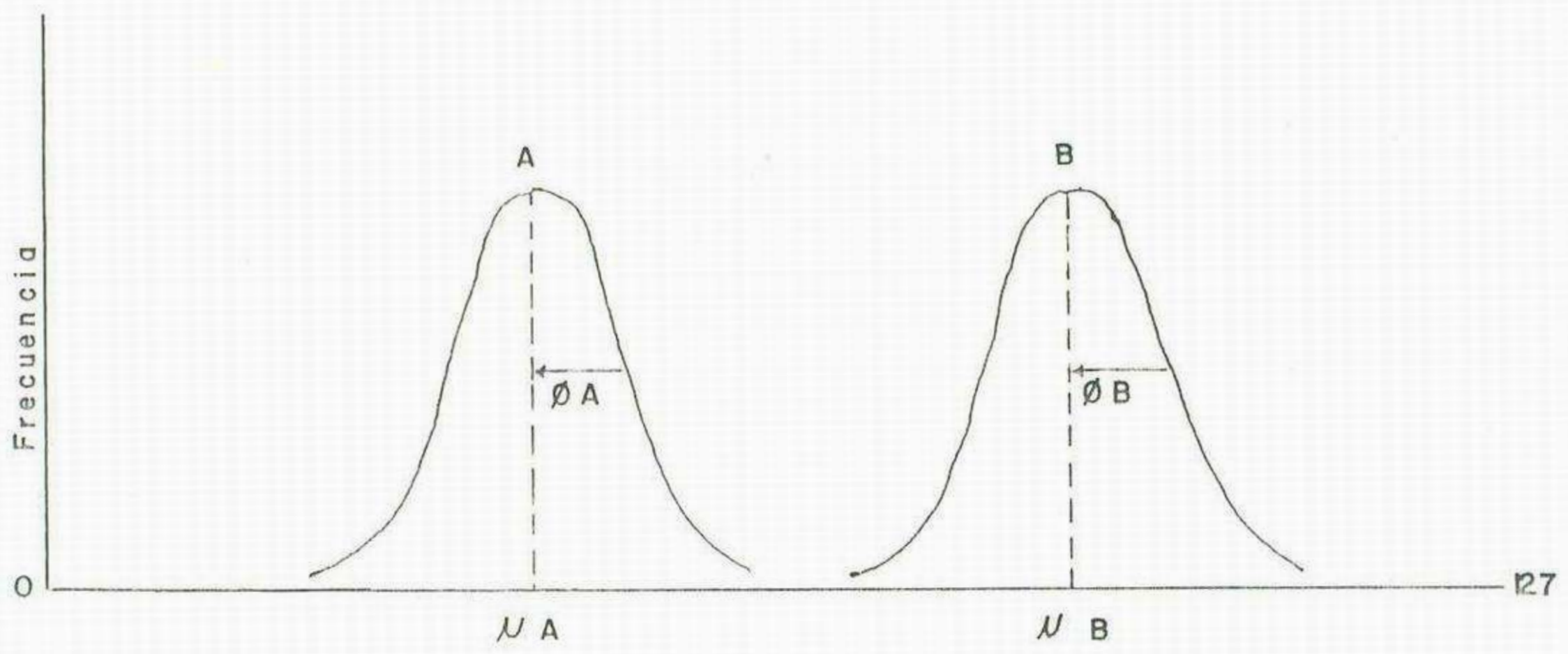


FIGURA 35. Agrupamiento de firmas espectrales del agua, suelos y vegetación





Separabilidad  $S = \frac{\mu_B - \mu_A}{\sigma_A + \sigma_B}$

FIGURA 36. Representación de la relación entre la separabilidad de los medios y las desviaciones normales.



clases de adiestramiento representativo que se usan en el enfoque no supervisado (Fleming, et al, 1975). Sin embargo, el elemento más importante que se requiere para determinar el juego óptimo de clase de entrenamiento continua siendo el aporte del analista y del usuario final. En otras palabras, los mejores resultados se obtienen por medio de técnicas de análisis ayudado por computadores pero con participación activa del intérprete.

Es necesario hacer énfasis en que la determinación de las clases de adiestramiento se constituye en el paso más crítico en toda secuencia de clasificación espectral (Bartolucci, 1979). Es claramente en este paso cuando el analista tiene que relacionar las clases espectrales con los tipos de cobertura real.

c).- Clasificación en toda el área de estudio.

En este paso el clasificador implementado por el computador hace prácticamente el trabajo. En esta etapa los parámetros estadísticos determinan las características espectrales de las clases que se usaron en el entrenamiento y entonces efectúa la clasificación de toda el área de estudio.

El clasificador es un algoritmo que toma decisiones y que puede ser entrenado para asignarle a cada pixel una clase determinada. Existen varias clases de clasificadores y difieren unos de otros en cuanto al tipo de decisión o regla de clasificación usada (Bartolucci, 1979). Se pueden mencionar el clasificador de probabilidad máxima por punto, clasificador de la distancia mínima, clasificador de cascada, paralelepipedo, clasificador de extracción y clasificación de objetos homogéneos, clasificador de niveles, el del vecino más cercano, etc..



d).- Representación pictórica y tabular de la clasificación resultante.

Al terminar la clasificación multiespectral los resultados se pueden presentar en distintos formatos de acuerdo con las necesidades y especificaciones del usuario. Existen tres tipos principales de formatos:

- Productos gráficos.
- Tablas estadísticas.
- Archivos de datos digitales.

Por ejemplo, el área clasificada podría presentarse como un mapa de escala determinada, proyección y unidad cartográfica mínima.

Las diferentes clases se pueden presentar mediante :

- Símbolos alfanuméricos, fig. 37
- Símbolos gráficos, fig. 38
- Niveles de gris.
- Impresión fotográfica.

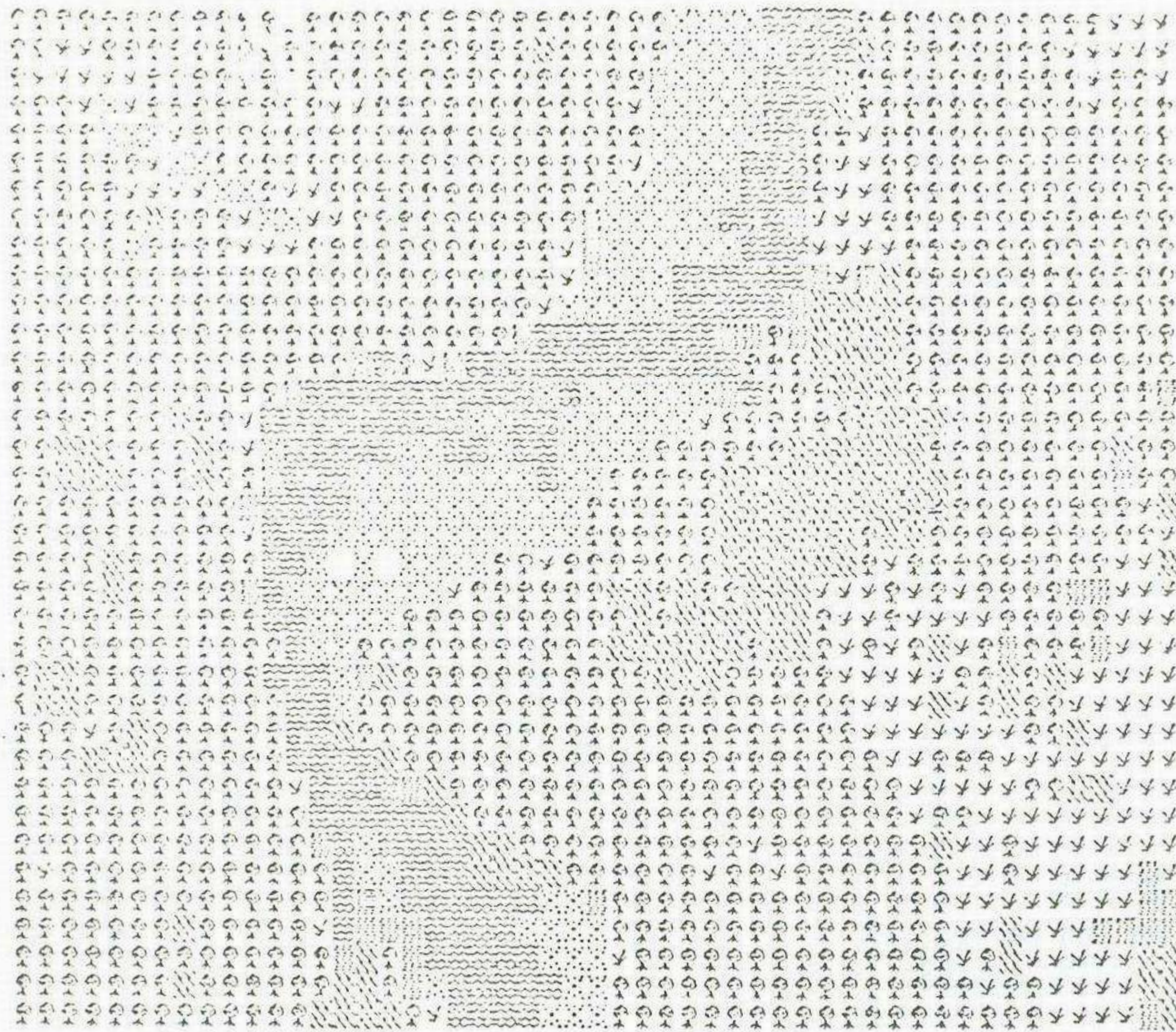
e).- Evaluación de los resultados de la clasificación.

Para que una clasificación multiespectral sea de utilidad práctica es necesario determinar su exactitud y confiabilidad. Usando el análisis numérico es posible evaluar cuantitativamente el grado de exactitud de una clasificación multiespectral. De acuerdo con Jensen (1984) un mapa de uso de la tierra debe tener confiabilidad del 85 %.









Agua



Bosque -1



Hierba



Suelos



Arena



Chaparral

Figura 38 Representación Gráfica de los Símbolos de una Clasificación Multiespectral Final.



La utilidad, exactitud y confiabilidad de los resultados de la clasificación dependen básicamente de la determinación apropiada de las clasificaciones espectrales que se utilizan en la fase de entrenamiento.

### 3). Clasificadores temporales.

Este método de clasificación es comúnmente conocido como detección de cambios. Las imágenes para hacer este tipo de detección deben de cumplir con los siguientes requisitos:

- . Que exista un periodo sistemático entre tomas (16 días por ejemplo).
- . Las imágenes deben de ser tomadas a la misma hora del día para minimizar los efectos del ángulo solar.
- . Tratar de mantener la misma escala y ángulo de vista para así tener la misma geometría.
- . Reducir el desplazamiento debido al relieve todo lo que sea posible.
- . Tener imágenes en las mismas regiones espectrales.

Las clasificaciones temporales generalmente se hacen usando la "Técnica de Reconocimiento de Patronas" bien por el enfoque supervisado o no supervisado pero en todo caso las "clases de cambio" deben tener diferencias significativas en sus estadísticas con las "clases de no cambio".

## 7. ALGORITMOS MAS USADOS EN CLASIFICACION DE IMAGENES.

### 7.1 El paralelepipedo.

Es una regla de decisión ampliamente usada (Addington, 1976)



se basa en un simple "SI/NO" lógico, definiendo los límites decisionales en forma de rectángulos. Los valores de reflectancia de cada pixel en las diferentes bandas son usados para producir un vector de valor medio de N dimensiones.

La pregunta que se debe hacer el computador para si un determinado pixel pertenece a una clase es:

$$M_{ck} = S_{ck} \leq V_{R_{ijk}} \leq M_{ck} + S_{ck}$$

donde  $M_{ck}$  = Es el valor medio de los datos del área de entrenamiento para una clase  $c$  en la banda  $k$ .

$S_{ck}$  = Es la desviación estandar.

$V_{R_{ijk}}$  = Valor de reflectancia para un pixel ubicado en coordenadas  $ij$  en las bandas  $k$ .

Se ha definido:

$$L_{ick} = M_{ck} - S_{ck} \quad \text{donde } L_i = \text{limite inferior.}$$

$$L_{sck} = M_{ck} + S_{ck} \quad L_s = \text{limite superior.}$$

y entonces el algoritmo del paralelepipedo finalmente es:

$$L_{ick} \leq V_{R_{ijk}} \leq L_{sck}$$

Cuando un pixel no satisface ninguno de los criterios planteados automáticamente es asignado a la categoría "sin clasificar".

En la figura 39 el pixel (a) debe ser clasificado como bosque, mientras que (b) está en la categoría sin clasificar. Los cálculos que prueban esta clasificación aparecen en la Tabla 3.

El algoritmo de paralelepipedo es uno de los métodos más eficientes en la clasificación de datos de sensores remotos,



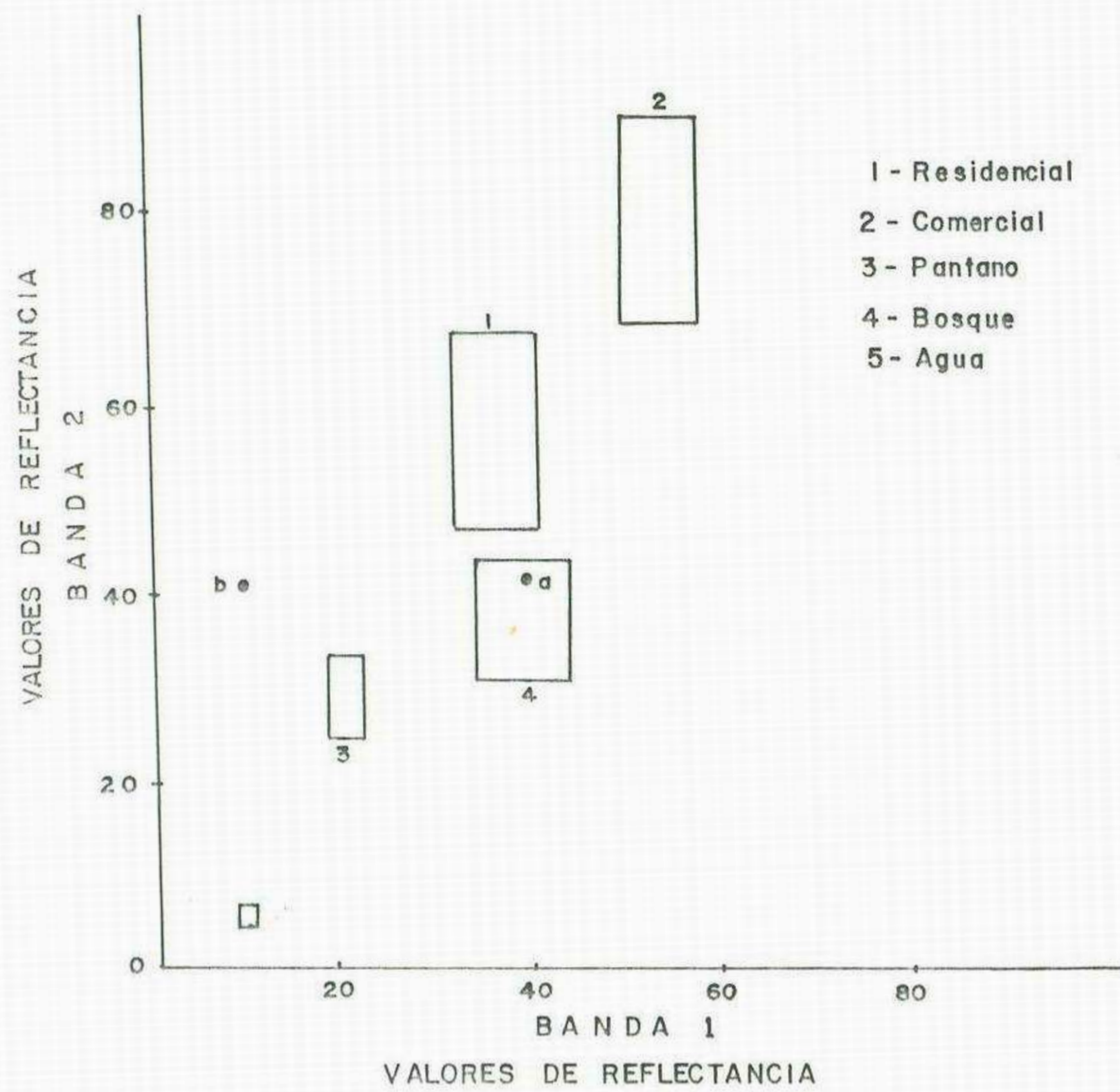


Figura 39 - Clasificador del paralelepipedo. Los puntos a y b. son pixeles de la imagen que deben ser clasificados, el pixel (a) tiene un valor de reflectancia de 40 en la Banda 1 y 40 en la Banda 2, mientras que el pixel 2 tiene 10 en la Banda 1 y 40 en la Banda 2. Los rectangulos representan la Regla de decisi3n.



TABLA No.3

CLASE	LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR	EL PIXEL	
			a (40.40) CUMPLE Lick a LSck	b (10.40) CUMPLE Lick a LSck
1 RESIDENCIAL				
Banda 1	$3.6-4.53=31.27$	$36.7+4.53=41.23$	Si	No
Banda 2	$55.7-10.72=44.98$	$35.7+10.72=67.42$	No	No
2 COMERCIAL				
Banda 1	$54.8-3.88=50.92$	$54.8+3.88=58.68$	No	No
Banda 2	$77.4-11.16=75.4$	$77.4+11.6=88.56$	No	No
3 PANTANOS				
Banda 1	$20.2-1.88=18.32$	$20.2+1.88=22.08$	No	No
Banda 2	$28.2-4.31=23.89$	$28.2+4.31=32.51$	No	No
4 BOSQUE				
Banda 1	$39.1-5.11=33.99$	$39.1+5.11=44.21$	Si	No
Banda 2	$35.5-6.41=29.09$	$35.5+6.41=41.91$	Si	No
5 AGUA				
Banda 1	$9.3-0.56=8.74$	$9.3+0.56=9.86$		No
Banda 2	$3.2-0.71=4.49$	$5.2+0.71=5.91$		No *

\* Asigne el pixel b a una categoría "sin clasificar".



desafortunadamente porque algunos de los paralelepípedos se superponen, caso de clase Residencial y Bosque en la fig. 39. es posible que un pixel pertenezca a más de una clase, en este caso se asigna a al primera clase donde cumpla la condición.



### 7.2 Clasificador de la distancia mínima.

consiste en hallar la media de los valores espectrales de cada clase de entrenamiento en cada una de las bandas  $M_{ck}$ , se calcula luego el vector del valor medio de los pixels que se desean clasificar. Este cálculo se hace:

$$\text{Dist} = \sqrt{(VR_{ijk} - M_{ck})^2 + (VR_{kjl} - M_{cl})^2}$$

En el ejemplo que se muestra en la fig. la expresión

Dist. a clase

$$1 = \sqrt{(VR_{ij1} - M_{i1})^2 + (VR_{ij2} - M_{i,2})^2}$$

se usa para encontrar la distancia de un pixel determinado a la clase 1 y de la misma forma se puede calcular la distancia a cualquiera de las cinco clases para luego determinar cual es la mínima distancia.

La tabla 4 muestra los cálculos para los pixels a y b del ejemplo de la fig. 40. De estos cálculos se deduce que el pixel (a) debe ser asignado a la clase 4 porque aquí donde se obtiene la mínima distancia (4.59) y la misma lógica puede ser aplicada para el pixel (b), cuya distancia mínima es la clase 3.

También se puede concluir que por este método de clasificación no quedarán pixels sin clasificar.

Finalmente es importante mencionar que cuando en la clasificación intervengan más de 2 bandas la expresión para el cálculo de la distancia es:

$$D_{AB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}$$

### 7.3 Clasificador del vecino más cercano.



TABLA No. 4

<u>CLASE</u>	<u>Distancia del pixel</u> a(40.40) a la media de la clase	<u>Distancia del pixel</u> b(10.40) a la media de la clase
1 RESIDENCIAL	$(40-36.7)^2+(40-55.7)^2=16.04$	$(40-36.7)^2+(40-55.7)^2=30.97$
2 COMERCIAL	$(40-54.8)^2+(40-77.4)^2=40.22$	$(10-54.8)^2+(40-77.4)^2=58.35$
3 PANTANOS	$(40-20.2)^2+(40-28.2)^2=23.04$	$(10-20.2)^2+(40-28.2)^2=15.75$ El pixel b debe ser asignado a esta clase por ser la distancia mínima.
4 BOSQUE	$(40-39.1)^2+(40-35.5)^2=4.59$ El pixel a debe ser asignado a esta clase por tener la distancia mínima.	$(10-39.1)^2+(40-35.5)^2=29.45$
5 AGUA	$(40-9.3)^2+(40-5.2)^2=46.4$	$(10-9.3)^2+(40-5.2)^2=34.8$



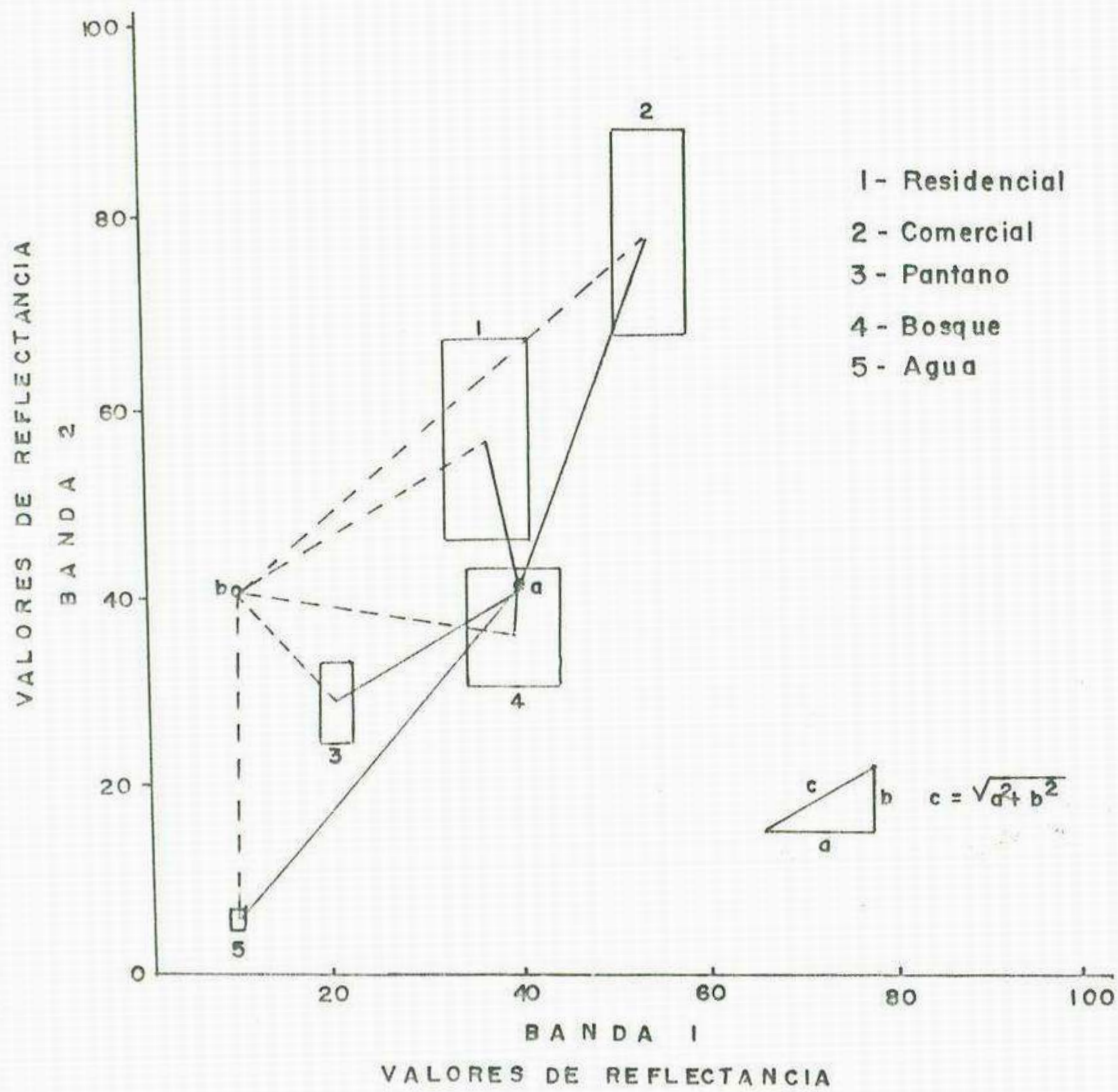


FIGURA 40. - Clasificador de la distancia minima. El pixel (a) pertenece a la clase bosque y el pixel (b) se le asigna la clase pantano.



Este método asume que la distribución de los pixels dentro de un "cluster" o agrupamiento sigue la distribución normal de Gauss. Fig. 41.

Bajo esta asunción el patrón de respuesta de una categoría o clase puede ser completamente descrito por el vector del valor medio y la matriz de las covarianzas.

El algoritmo permite establecer para cada pixel, la probabilidad de pertenecer a un determinado agrupamiento o clase y elabora una serie de curvas.

#### 7.4 Clasificador de agrupamiento natural.

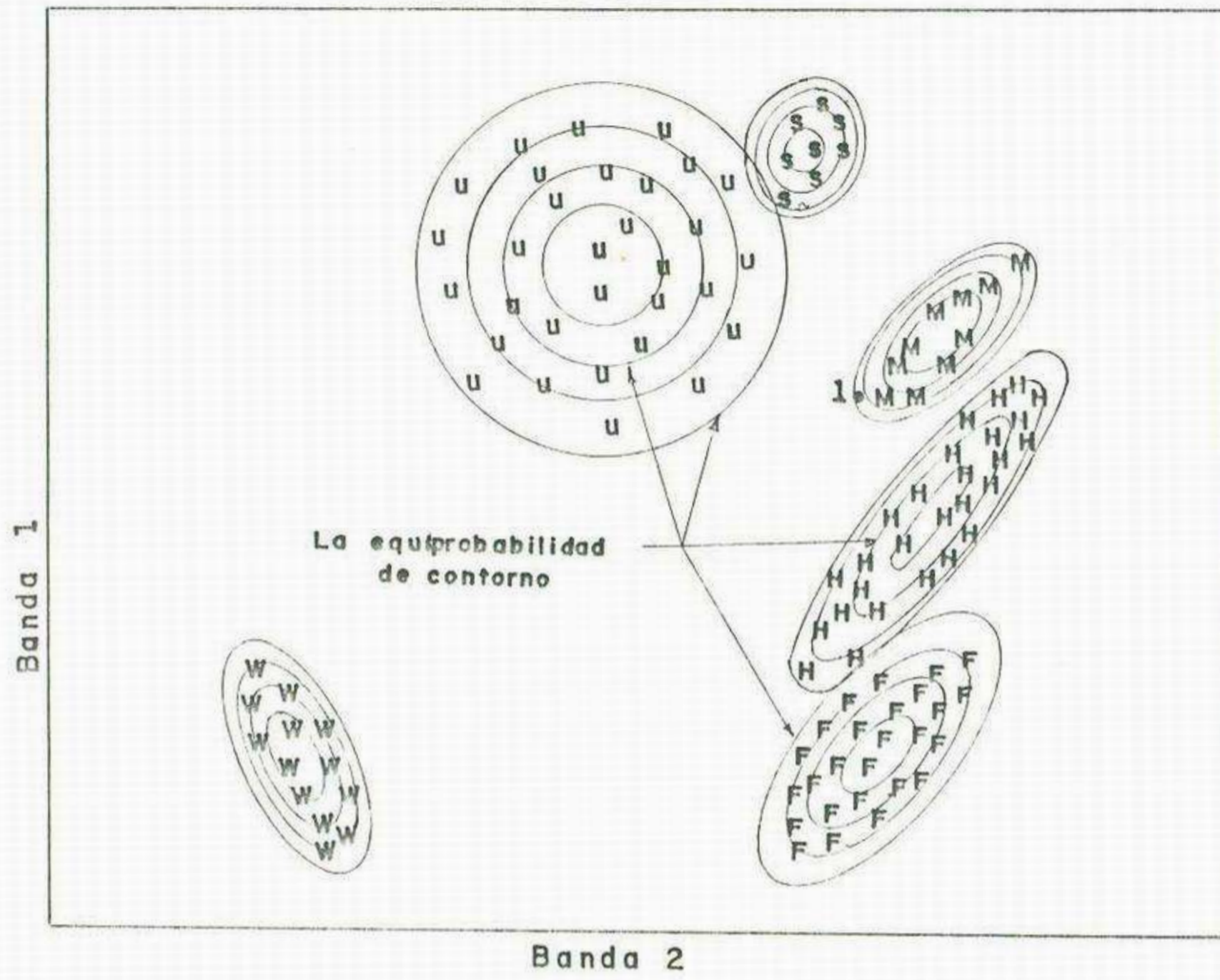
Este clasificador se usa para clasificaciones no supervisadas, existen cientos de métodos para agrupar los valores de reflectancia uno de los más conocidos es el llamado "Reconocimiento de patrones".

En este método el computador hace un agrupamiento natural, calcula valores estadísticos y luego extrapola esa información para así clasificar toda la imagen.

A continuación se describe un algoritmo de agrupamiento que conceptualmente es muy simple y eficiente. Opera en dos etapas en la primera el programa lee a través de los datos y secuencialmente va construyendo los "clusters" además de un vector del valor medio asociado con cada grupo. En la segunda etapa se calcula para todos los pixels la mínima distancia (algoritmo similar ya descrito) y entonces cada pixel es ubicado en una clase.

Los únicos datos que el analista debe suministrar para aplicar este algoritmo son:





W= Agua    U= Urbano    S= Arena    M= Maiz    H=Heno    F= Bosque

FIGURA 41.- Clasificador del vecino más cercano.



• El radio de cada grupo  $R$  en valores espectrales (15 para el ejemplo).

• La distancia entre grupos  $C$ .

• El número de pixels involucrado en cada grupo  $N$ .

• El número máximo de grupos que deben ser identificados por el algoritmo (10 por ejemplo). Fig. 42.

Empezando en el origen, los pixels son evaluados secuencialmente de izquierda a derecha.

Veamos un ejemplo con 3 pixels que tienen valores de reflectancia en las bandas 1 y 2 (MSS) tal como se muestra en la figura 42.

En la primera fase se asume que los valores asociados con el pixel número 1 representan el vector del valor medio del grupo 1. Se debe recordar que este es un vector en  $n$  dimensiones para el ejemplo  $n=2$ , de la misma forma los valores del pixel 2 deben ser considerados como el vector del valor medio para el grupo 2, ahora bien si la distancia (espectral) entre el grupo 1 y 2 es mayor que  $R$  entonces los dos grupos existen separados. De otra forma, los dos entran a conformar un solo grupo y el vector del valor medio de este nuevo grupo empieza a ser el promedio de los valores de reflectancia del pixel 1 y 2 es 14.14.

$$D = 14.14, \text{ fig. 43.}$$

y el radio fue inicialmente definido como 15, entonces el grupo 2 no existe y por lo tanto el vector de valor medio del nuevo grupo  $M = (15.15)$  como se muestra en las figs. 43 y 44.

Considerando el pixel 3 como el vector del valor medio para un nuevo grupo, se halla la distancia de este a la nueva posición



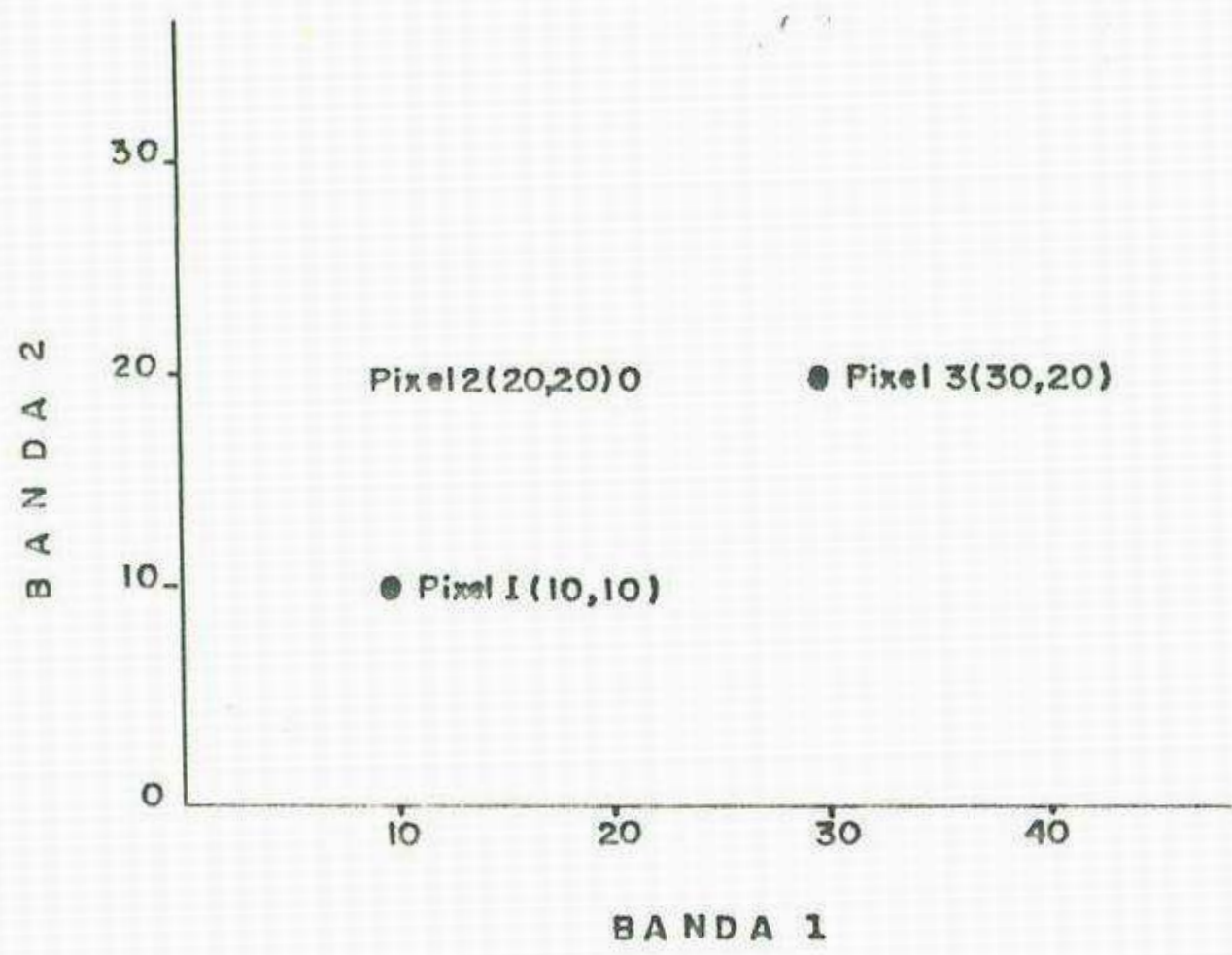


FIGURA.42.- Valores originales para los pixeles 1, 2 y 3

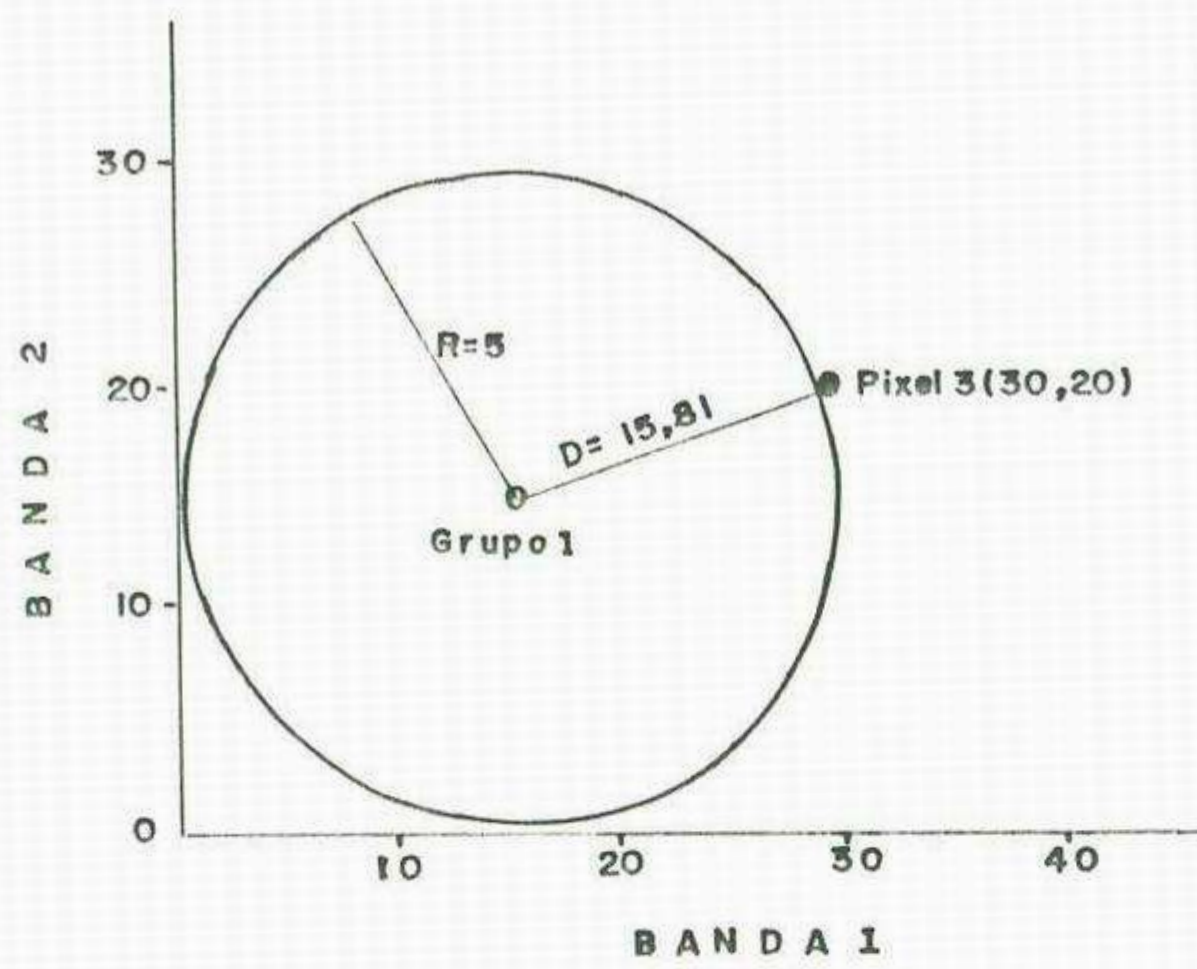


FIGURA 44.- Pixel 1 y 2 están ahora representados en grupo 1 el cual migró al valor (15, 15)



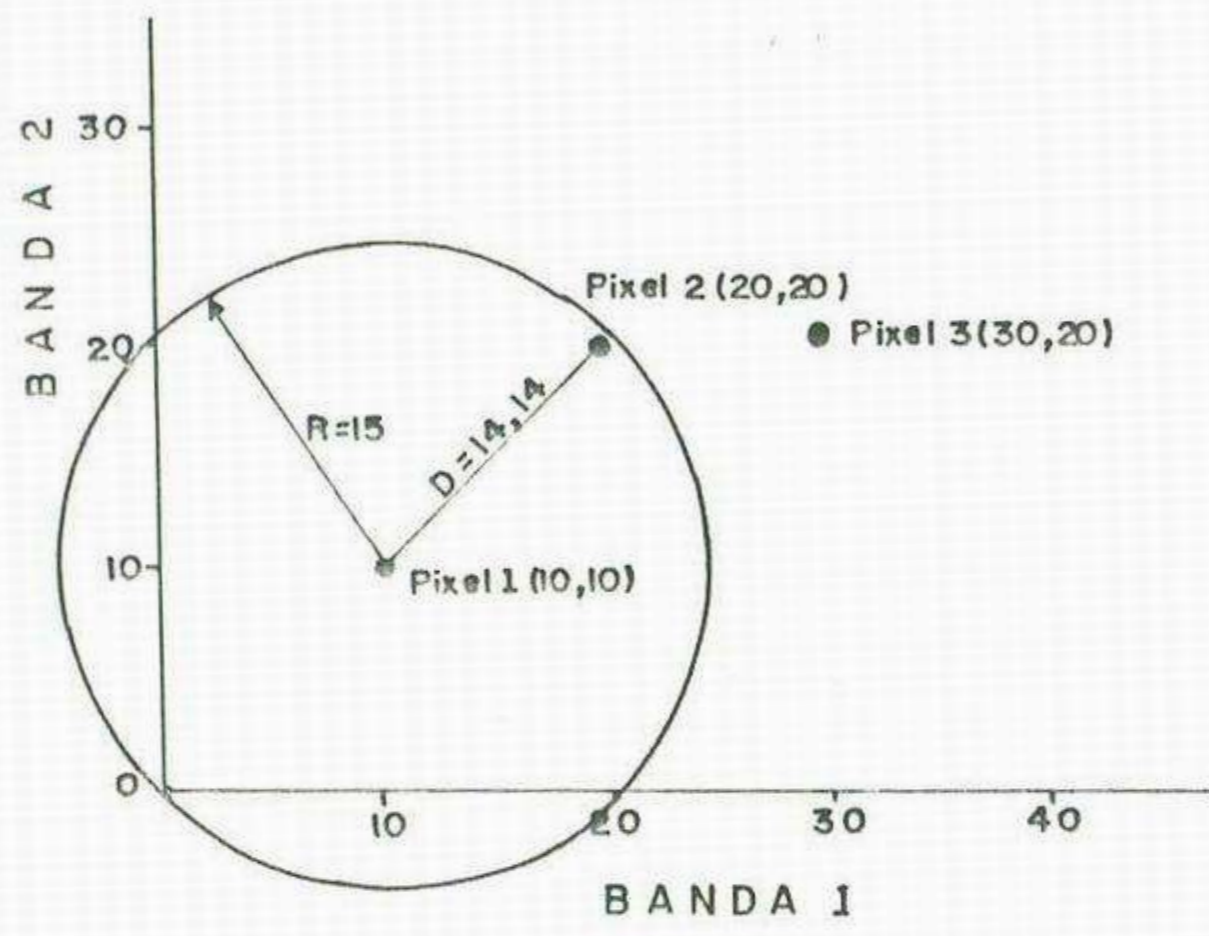


FIGURA 43.- Distancia entre pixel 1 y 2 en un espacio bidimensional



del grupo 1 y se encuentra que  $D=15.81$  por lo tanto  $D=5$  en consecuencia el pixel 3 pertenece al grupo 2, tal como se muestra en la fig. 44.

En la segunda fase cuando ya se tiene el vector del valor medio se clasifica toda la imagen asignando cada pixel a una clase, utilizando el algoritmo de la minima distancia.



## BIBLIOGRAFIA

- ALLEN W. A., RICHARDSON A.J., "Interaction of Light With a Plant Canopy", Proceeding of the 5th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol. 2, pp. 1245-1258, University of Michigan, Ann Arbor, May, 1971.
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY, 1983. Manual of Remote Sensing, Vol. II, pp. 1667-1916.
- BARTOLUCCI, L. A. "Procesamiento Digital de Datos Multiespectrales. Percepción Remota". Presentado en la semana de Intercambio Tecnológico, 14-19 mayo 1979. Panamá, República de Panamá: DMA IAGS.
- BAUM, V. A., BAKER, C.. "Investigation of the absorption of Solar Radiation by Various Materials", Applied Solar Energy, Vol. 2, No. 3, pp. 49-55, 1966.
- BAUMGARDNER M. F., KRISTOF S., JOHANNSEN C. J., ZACHARY A.. "Effects of Organic Matter on the Multiespectral Properties of Soil", LARS Information Note 030570, Purdue University, 1970.
- BOWERS S.A., HANKS R.J.. "Reflection of Radiant Energy From Soils", Soil Science, Vol. 100, No 2, pp 130-138, 1965.
- BRAUN, D. P., 1982. A structural synthesis of Brasil, based on the study of major lineaments derived from remote sensing imagery interpretation, Photogrammetry 37, 77-108.
- BROWN W. L., POLCYN F. C., STEWART S. R., "A Method for Calculating Water Depth, Attenuation Coefficients, and Bottom Reflectance Characteristics" Proceeding of the 7th



- International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Vol. 1, pp. 663-681, University of Michigan, Ann Arbor, May, 1971.
- BRUCK, P. & CONNOR, P., 1982. Relationship of hidrothermal phenomena within the Leinster Granite to crustal fractures delineated from Landsat imagery. Photogrammetry 37, 151-159.
  - CURLIS, J., FROST, V. & DELLWING, L., 1986. Geological mapping potential of computer enhanced images from the shuttle imaging Radar: Lisbon Valley Anticline, Utha. Photogrametric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 4, pp. 525-532.
  - DAHL O. J., DIJKSTRA E. W., HOARE C. A. R.. Programación Estructurada. Buenos Aires, Tiempo Contemporaneo, 1976. 218 p..
  - DIEDERIX H.. Landsat su sistema, datos y el procesamiento digital. Bogotá, D. E.: Centro Interamericano de Fotointerpretación, 1981. 1-3995.
  - DONKER N. H., 1962. Microcomputer Applications in Earth Sciences Data Processing, I.T.C. Journal.
  - DWORATSCHEK S.. Introducción al Proceso de Datos. Barcelona, Alhambra, 1974, 471 p.
  - FLEMING M. D., BERKEBILE J. S., HOFFER R. M.. "Computer Aided. Analysis of Landsat. Data-a. Comparison of Tree Approaches, Including a "Modified Clustering" Approach", West Lafayette, Indiana: Purdue University (Note Laboratory for Application of Remote Sensing), 1978.



- GATES D. M., TANTRAPORN, W., 1952. "The Reflectivity of Deciduous Trees and Herbaceous Plants in the infra-red to 25 microns", Science, Vol. 115, pp. 613-616, June, 1952.
- GATES D. M., "Characteristics of Soil and Vegetated Surfaces to Reflected and Emitted Radiation" Proceedings of the 3rd International Symposium on Remote Sensing of Environment, pp 573-600, University of Michigan, Ann Arbor, 1964.
- GAUSMAN H. W., CARDENAS R., "Effects of Pubescence on Reflectance of Light", Proceedings of 5th Symposium on Remote Sensing of Environment, pp. 291-297, University of Michigan, Ann Arbor, April, 1968.
- GONZALEZ R., WINTZ P., Digital Image Processing. Reading, Ma.: Addison-Wesley Publishing Company, 1977. 1-4194.
- HADLEY G., Linear Algebra. Massachusetts, Addison Wesley, 1965, 220 p.
- HONEY M., SCHOLZ D., FUHS N., "Evaluation of Several Schemes for Classification of Remotely Sensed Data", Photogrametric Engineering and Remote Sensing 46 (December 1980): 1547-1554.
- HOVAROTH E., MONTRBOMEY O., VAN ZILE B., "The Effect to Altitude on the Multispectral Mapping of Soil Organic Matter", Proceeding of the Indiana Academy of Science for 1970, Vol. 80, pp. 476-482, 1971.
- HOVIS W. A., CALLAHAN W. T., "Infrared Reflectance Spectra of Igneous Rocks, Tuffs and Red Sandstone from 0.5 micrometres. Journal of the Optical Society of America, Vol. 7, pp. 23-30, 1971.



- HOVIS W. A., "Infra-red Spectral Reflectance of Some Common Materials", Applied Optics, Vol. 5, No. 2, pp 130-138, 1965.
- HUNT G. R., SALISBURY J. W., "Visible and Near Infra-red Spectra of Minerals and Rocks: I, Silicate Minerals", Modern Geology, Vol. 1, pp 283-300, 1970.
- HUNT G. R., SALISBURY J. W., "Visible and Near Infra-red Spectra of Minerals and Rock: II, Carbonates", Modern Geology, Vol. 2, pp. 23-30, 1971.
- JENSEN J. R., Introductory Digital Image Processing, A Remote Perspective. Prentice Hall, Englewood cliffs, New Jersey, 1987.
- JERLOV N. G., "Influence of Suspended and Dissolved Matter on the Transparency of Sea-Water", Tellus 5, No. 1, pp 59-65, 1953.
- KUNAR R., "Radiation from Plants-Reflection and Emission: A Review", Report, Purdue Research Foundation-Research Project No. 5543, February, 1972.
- LILLESAND T. M., KIEFER R. W., Remote Sensing and Image Interpretation. New York: John Willey & Sons, 1980.
- LIPSCHUTZ S., Algebra Lineal: Teoria y Problemas, New York, Mc Graw Hill, 1968 p. 334.
- LYON R. J. P., "The Multiband Approach to Geological Mapping from Orbiting Satellites: Is it Redundant or Vital ?", Remote Sensing of Environment, Vol. 1, pp. 237-244, 1970.
- MITRA D., & VARADARAJAN K., Correlation of Landsat Data With Surface and Subsurface information, Int. J. Remote



- Sensing, 1985, Vol. 6, Nos. 3 y 4, 497-506.
- MOTK J., Digital Processing of Remotely Sensed Images, Washington, D. C.: National Aeronautic and Space Administration, 1980.
  - MOORE G., 1984. Objective Procedures for Lineament Enhancement and Extraction. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 49, No. 5, pp. 641-647.
  - MOWER R. D., ARDILLA M., DANDO W. A. ed. Remote Sensing in Colombia. Grand Forks, ND.: University of North Dakota Institute for Remote Sensing, 1984.
  - MYERS V. I., "Soil, Water, and Plant Relations", Chapter 6 of Remote Sensing, Produced by the Committee on Remote Sensing for Agricultural Purposes, Published National Academy of Sciences, 1970.
  - O'LEARY D., FRIEDMAN J., & POHN H., 1976. Lineament, Linear, Lineation: Some Proposed New Standards for Old Terms. Geol. Soc. Am. Bull, 87, 1463-1469.
  - QURESHY M. N., 1983. Geophysical and Landsat Lineament Mapping an Approach Illustrated from West-Central and South India. Photogrammetric, 37, 161-184.
  - RAKSHIT A. M. & SWAMINATHAN V., 1986. Application of Digitally Processed and Enhanced Landsat Imagery for Geological Mapping and Mineral Targeting in the Singhbhum Precambrian Mineralized Belt, Bihar-Orissa. Int. J. Remote Sensing, Vol. 6, Nos. 3-4, pp. 457-471.
  - "REMOTE MULTIESPECTRAL SENSING IN AGRICULTURE", Report of the Laboratory of Agricultural Remote Sensing, Vol. 3, Purdue University Agricultural Experiment Station, Research
  - WERNER D. H., SCHMER F. A., HORTON M. L., WALTZ F. A.; "Applications of Remote Sensing Techniques to Monitoring Soil Moisture", Proceeding of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment + pp. 10-12