

CAPITULO I

1. INTRODUCCION

Mundialmente, 1997 y 1998 fueron los peores años de los últimos tiempos en cuanto a incendios forestales. En este corto periodo los hubo en todo el planeta, desde Australia hasta el Perú, de Canadá a Kenya. La amplia difusión periodística de la destrucción producida por los siniestros desastrosos en Indonesia y Brasil, los países que perdieron zonas más vastas de bosques por el fuego, contribuyó a sensibilizar al público sobre los efectos mundiales de estas calamidades ambientales. En forma especial, 1998 fue un año en el que los incendios destruyeron enormes superficies cubiertas de biomasa en muchos países, incluyendo desde luego a México.

Según la FAO las consecuencias de muchos incendios rebasaron las fronteras políticas y alcanzaron proporciones regionales y aún mundiales. El humo de los incendios de Indonesia, México y Centroamérica, por ejemplo, puso en peligro la salud pública, interrumpió el tránsito, afectó al turismo y al comercio y repercutió en economías muy alejadas del lugar de los propios incendios. Un incendio es una quema fuera de control que afecta terrenos cubiertos con selvas, manglares, sabanas o pastizales naturales en áreas forestales. Entendiendo lo anterior queda claro que no cualquier tipo de fuego puede considerarse un incendio forestal. Se puede establecer una clasificación de los tipos de incendios forestales, dependiendo de la forma en que se presentan lo cual está determinado, básicamente por los combustibles.

Asimismo, uno de los problemas actuales que más preocupa a la sociedad es la devastación de los bosques y zonas verdes ocasionada por los incendios. Estos incendios forestales tienden a afectar el desarrollo de las actividades humanas. En nuestro país, esto se ha reflejado considerablemente con la pérdida de grandes extensiones de territorio verde. La temporada de incendios forestales en México coincide con la época seca, que

comprende principalmente los meses de enero a mayo, dependiendo de la situación geográfica de las diferentes regiones. El factor que más resalta es el calor, pues éste tiende a propagar las llamas una vez que éstas se han iniciado, aunado con la acción del viento cuando éste hace presencia propagando el fuego. De acuerdo con un estudio realizado, se ha observado que los meses más críticos para la propagación de los incendios forestales son: marzo, abril y mayo (Galindo y Solano, 1999). La causa principal de los siniestros se debe, en un gran porcentaje, a los casos de descuido humano o intencionales; el restante se debe a otros factores, como el hecho de que se haya adelantado la temporada de sequía, a consecuencia del fenómeno meteorológico “El Niño-La Oscilación del Sur”, (ENSO por sus siglas en inglés).

Uno de los instrumentos a bordo de los satélites NOAA de órbita polar es el llamado Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR). Aunque este instrumento no fue diseñado específicamente para efectuar trabajos de radiometría, sino que para usarse como un sensor de imágenes con propósitos meteorológicos, es a partir de su calibración en unidades absolutas que el AVHRR puede hacer determinaciones físicas cuantitativas. Esta extraordinaria coincidencia pronto se vio reflejada en aplicaciones novedosas e independientes de su función primaria (Prata, 1989). Por primera vez en México, el Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias del Ambiente (CUICA) de la Universidad de Colima, cuenta con una estación receptora de señales de satélites NOAA “en tiempo real”. Diariamente se reciben seis imágenes; los datos son procesados, revisados y almacenados para su posterior análisis e investigación. También se envían dos reportes a las instancias correspondientes.

Con esta información se ha podido llevar a cabo un estudio de las condiciones que se tienen “en tiempo real” en el estado de Nuevo León y generar de igual forma una estrategia de detección y combate de incendios forestales en la región, aprovechando al máximo de toda la tecnología y con ello salvar grandes extensiones de bosques, parques nacionales, reserva de ecosistemas, áreas naturales protegidas, etc. que a su vez generan o desencadenan en otros grandes problemas de contaminación ambiental como la bruma.

Definición del proyecto

El presente trabajo es una contribución a la detección oportuna de un incendio con el uso de imágenes de satélite obtenidas con el Radiómetro AVHRR, para con ello disminuir, en gran medida los efectos adversos, tanto al medio ambiente como a la sociedad; así como su clasificación básica en incendios forestales en áreas naturales protegidas, bosques fragmentados y quemas agrícolas. Es conveniente tomar en cuenta que, para que se produzca un incendio, se necesitan tres elementos: *calor*, *oxígeno* y *combustible*. En los incendios forestales el oxígeno se encuentra siempre disponible en la atmósfera de las áreas forestales y el producido por las plantas, el calor proviene de la radiación del sol que seca la vegetación y de la flama que inicia el fuego, y el combustible es la vegetación forestal disponible para quemarse, junto con toda aquella materia orgánica que pudiera consumirse; sin embargo, existen algunos factores controlables, para evitar pérdidas de área verde: los combustibles y la flama, dos factores importantes en los que el hombre puede intervenir.

En el Estado de Nuevo León, que con 64,210 km² ocupa el 3.3 % de la superficie del territorio nacional, los incendios forestales estuvieron a la orden del día durante 1997 y 1998, siendo en este último año cuando se presentaron y afectaron grandes áreas de bosques y matorrales, entre las que se encuentran por citar algunas, el cerro del Potosí, Chipinque, etc. provocando efectos ambientales en las zonas siniestradas como: desplazamiento de especies, pérdida de biodiversidad, destrucción de ecosistemas, erosión de suelos, etc.

1.1 Objetivo y Alcances

En consideración a lo anterior, la detección oportuna de un incendio forestal puede ser de gran ayuda para su pronto combate y control, y tratar de minimizar las consecuencias que afectan no sólo el medio ambiente local, sino que trasciende en el transporte de los contaminantes como son: la bruma, las partículas menores que 10 micras, los gases asociados con la lluvia ácida, etc. En materia de protección, año con año durante el estiaje

los incendios forestales, intencionales o no, constituyen el mayor factor de riesgo y perjuicio que causan daños considerables no sólo a diferentes estratos del bosque, sino a la diversidad biológica.

Hipótesis

- Si se dispone de métodos adecuados para detectar los incendios forestales en tiempo real, y de una efectiva comunicación entre el CUICA de la Universidad de Colima y las dependencias estatales responsables de la coordinación de brigadas de combate y control de incendios, será posible controlarlos con mayor rapidez, reduciendo los riesgos inherentes.
- Si se obtiene la información necesaria y suficiente con imágenes satelitales, se pueden monitorear las condiciones que prevalecen en el área de estudio y con ello establecer un programa de acción y respuesta inmediata ante la presencia de un incendio forestal.
- La detección oportuna de los incendios forestales y su inmediato combate y control, permitirá disminuir, en gran medida, los problemas de contaminación ambiental, desplazamiento de especies, pérdida de ecosistemas, etc.

Método

El presente trabajo se realizó en el Centro Universitario de Investigaciones en Ciencias del Ambiente de la Universidad de Colima (CUICA), mediante un análisis de imágenes de satélite, evaluando y simulando en programas de computo para con ello, poder establecer estrategias que ayuden a la detección, combate y control rápido de incendios forestales utilizando el método multiespectral desarrollado por Galindo y Solano (1999). El método, que utiliza prácticamente todos los canales del radiómetro AVHRR, tiene como finalidad hacer una descripción más completa del incendio, su georeferenciación, su ubicación y una estimación del área y la identificación del humo. Con este método se ha integrado una base de datos referente a los incendios forestales ocurridos en México y esto permitirá conocer con mayor certidumbre los mecanismos naturales de iniciación de incendios, para contar con datos sobre las perturbaciones climáticas originadas por la bruma y el humo de los incendios.

El presente trabajo, se estructuró y desarrolló en los siguientes capítulos:

- CAPITULO I** Introducción.
- CAPITULO II** Los incendios forestales y sus efectos en el medio ambiente
- CAPITULO III** Determinación de los incendios forestales “en tiempo real” mediante imágenes NOAA-AVHRR y S.I.G.
- CAPITULO IV** Los incendios forestales en Nuevo León temporada 1999-2000
- CAPITULO V** Eventos detectados en el Estado de Nuevo León
- CAPITULO VI** Mitigación de efectos mediante la detección temprana
- CAPITULO VII** Conclusiones y recomendaciones

En el capítulo uno se analiza el tema, en general y se establece la finalidad del trabajo, con el planteamiento de objetivos e hipótesis, el método empleado y la definición del proyecto de investigación.

En el capítulo dos se presenta un análisis del fenómeno, se habla de los tipos de incendios, su generación y sus efectos en el medio ambiente. Asimismo, se describe uno de los eventos que están íntimamente relacionados con su generación.

En el capítulo tres se describe el método empleado, las características físicas de un “punto caliente” y el aparato de detección, así como el vehículo que lo transporta; para finalmente caracterizar, con los elementos anteriores el método multispectral, con su aplicabilidad en la detección en tiempo real de incendios forestales, a partir de imágenes digitales.

En el capítulo cuatro, después de analizar un evento con todas sus características así como de las bondades de la metodología se establece en el tiempo y se delimita un área de estudio; en este caso, el Estado de Nuevo León, abundando en las características fisiográficas y la situación en materia de detección y combate de incendios forestales.

En el capítulo cinco se presentan imágenes de los principales sistemas de “puntos calientes” detectados en el periodo de estudio, mediante el uso de un sistema de información geográfica. Los datos preliminares de un siniestro se proyectan en la cubierta vegetal de México, preparada por el Instituto Nacional de Ecología, haciendo un corte para el estado de Nuevo León y distribuyendo los incendios en tres grupos básicos: áreas naturales protegidas, bosques fragmentados y quemas agrícolas.

En el capítulo seis se discute el trabajo, con un análisis de los principales incendios forestales ocurridos en el Estado de Nuevo León durante la temporada 1999-2000. Asimismo se habla de las ventajas del sistema de detección temprana para con ello establecer medidas de prevención, control, mitigación, etc. A fin de evitar problemas ambientales, desde pérdida de biodiversidad, el desplazamiento de especies, los ecosistemas alterados y tensionados y la adaptabilidad de especies en nuevos hábitat.

Finalmente, en el capítulo siete se presentan las conclusiones y algunas de las recomendaciones más importantes referentes a la detección temprana y el combate de incendios forestales, así como la propuesta de campañas de protección de bosques y la actitud recomendable en el caso de un incendio forestal.

CAPITULO 2

LOS INCENDIOS FORESTALES Y SUS EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE

Aspectos Generales.

Desde el punto de vista físico, los factores climáticos, fisiográficos y edáficos en forma conjunta han propiciado una gran variedad de ambientes que han sido determinantes en la riqueza biológica de México. De acuerdo con los biogeógrafos, la mayor parte del territorio mexicano se encuentra entre dos regiones: la Neotropical (que corresponde a América Central y América del Sur) y la Neártica o Boreal (que corresponde a América del Norte) dando como resultado una rica mezcla de flora y fauna, variedad de climas y de suelos.

Los bosques y las selvas son muy importantes para el ser humano, por la biodiversidad que contienen; son los principales reguladores de las condiciones climáticas, coadyuvan de gran manera en la infiltración del agua de lluvia a los mantos acuíferos, permiten la conservación y recuperación del suelo, mantienen las cuencas hidrológicas, ofrecen alternativas para la ejecución de estudios científicos en centros de investigación, son áreas de esparcimiento para la ciudadanía en general y significan una importante fuente de ingresos económicos a sus poseedores. En relación con el secuestro de dióxido de carbono, se sabe que los bosques son almacenes naturales de carbono que ayudan a mitigar el calentamiento global. Se ha estimado que la captura de carbono por los bosques y selvas de México, tiene un costo que varía de 650 a 3400 dólares por hectárea (INEGI-SEMARNAP, 1998).

Sin embargo, la destrucción de hábitat naturales es una de las causas más severas que ha propiciado la pérdida de la biodiversidad; no sólo en México, sino a escala mundial.

Las principales amenazas que afectan a los ecosistemas, además de la señalada son: la deforestación, la agricultura, la ganadería, la erosión y los incendios forestales. Así, en nuestro país basta decir que solamente en 1998 se registraron 14.300 incendios forestales que afectaron aproximadamente 583.000 ha (SEMARNAP, 1998). Analizando este hecho, se verán los tipos de incendios y la temporada propicia de su generación.

2.1. Tipos de incendios forestales

Un incendio forestal es un siniestro causado intencional, accidental o fortuitamente por el fuego que se presenta en áreas cubiertas de vegetación, árboles, pastizales, maleza, matorrales, etc. Los incendios forestales son una parte importante del proceso de sucesión vegetal; son normales y hasta necesarios en los bosques para garantizar su continuidad (Semarnap, 1999). Para que se produzca un incendio se necesitan tres elementos: *calor, oxígeno y combustible*. En los incendios forestales el oxígeno se encuentra siempre disponible en la atmósfera de las áreas forestales producido por las plantas, el calor proviene de la radiación del sol que seca la vegetación y de la flama que inicia el fuego, y el combustible es la vegetación forestal disponible para quemarse junto con toda aquella materia orgánica consumible.

Sin embargo, existen algunos factores que pueden controlarse (como son los combustibles y la flama) para evitar pérdidas de área verde, dos factores importantes en los que el hombre puede intervenir. Se puede establecer una clasificación de los tipos de incendios forestales dependiendo de la forma en que se presentan, los cuales son determinados básicamente por los combustibles, estos son:

- **Incendio subterráneo.** Ocurren por la acumulación de materia orgánica que por fermentación sufre un incremento de temperatura; los daños dependen de la profundidad del fuego. Este se propaga bajo la superficie del terreno, afectando las raíces de los árboles y la materia orgánica acumulada en grandes afloramientos de roca. Se caracteriza por no generar llamas ni humo.

- **Incendio superficial.** Sucede cuando hay una cantidad moderada de material orgánico y quema las hojas en el suelo, arbustos y árboles pequeños. Su daño depende de factores como el viento, especies afectadas, etc. Además de dañar principalmente a los pastizales y vegetación herbácea que se encuentra entre la superficie terrestre y hasta 1.5 metros de altura deteriora sumamente la regeneración natural y la reforestación.
- **Incendio de copa, de corona o aéreo.** Es más perjudicial, porque incendia las ramas y las hojas de los árboles, dejándolos sin medios para sobrevivir en ellos se pueden alcanzar temperaturas de hasta 1100°C. Este tipo de incendio afecta gravemente a los ecosistemas pues destruye toda la vegetación y en grados diversos daña la fauna silvestre.

En México, el incendio más frecuente es de tipo superficial (poco más del 90%). Se presenta en ecosistemas con baja densidad de vegetación deteriorando la regeneración natural y la reforestación

2.1.1 Temporada de Incendios Forestales.

Sin duda, uno de los problemas actuales que más preocupa a la sociedad es la devastación de los bosques y zonas verdes ocasionadas por los incendios, estos incendios forestales tienden a contribuir y afectar el desarrollo de nuestras actividades. En nuestro país, se ha reflejado considerablemente con la pérdida de grandes extensiones de territorio verde.



Fig. 2.1 Consecuencias del incendio en el parque Chipinque 1998

La temporada de incendios forestales coincide con la época seca, la que comprende principalmente los meses de noviembre a mayo, dependiendo de la situación geográfica de las diferentes regiones. El factor que más resalta es la temperatura, pues ésta tiende a propagar las llamas, una vez que éstas se han iniciado, aunado con la acción del viento cuando éste hace presencia propagando de esta manera el fuego. Así, se ha observado que los meses más críticos en la propagación de incendios forestales, en todo el país, son: marzo, abril y mayo; siendo prácticamente en estos tres meses mencionados cuando se ha registrado el mayor número de siniestros. Los impactos de un incendio en la superficie pueden ser graves; por un lado está la disminución de la fauna y la flora, así como una mayor predisposición al ataque de plagas y enfermedades, y por el otro la reducción en la calidad de los suelos, las modificaciones al hábitat y las alteraciones al medio ambiente; sobre todo a la calidad del aire.

2.1.2 Daños en el ambiente provocados por los incendios forestales.

Por sus condiciones climáticas y fisiográficas, México es particularmente vulnerable a incendios forestales durante el periodo de estiaje. Las medidas para prevenir, detectar y combatir los incendios forestales contribuyen a contener el deterioro del medio ambiente y de los recursos naturales, toda vez que se estima que hasta un 48% de la deforestación en los bosques templados y un 13% de aquella que afecta a las selvas, se deben a incendios forestales. A pesar de que las condiciones climatológicas no resultaron particularmente favorables, en 1999 el fenómeno de los incendios forestales tuvo un comportamiento cercano a la normalidad, expresada en las medias históricas anuales, en contraste con la situación presentada en 1998.

En promedio anual, durante el periodo 1992-1997 se registraron en el ámbito nacional 7,198 incendios forestales que afectaron una superficie de 181,109 ha siendo el indicador de superficie afectada por incendio en promedio, fue de 25 ha. En 1998 se presentaron 7,979 incendios forestales, los cuales afectaron 231,061 hectáreas, con un promedio de 29.6 hectáreas afectadas por incendio. (Semarnap, 1998). Casi la totalidad de los incendios forestales ocurridos en México se debió a causas humanas, ya sea por accidente, negligencia o intencionalidad. Cerca del 49% de los incendios forestales tienen

su origen en una falta de control en el uso del fuego con fines agropecuarios o silvícolas. Como sucede en muchos otros países tropicales, la cultura campesina tradicional mexicana incluye prácticas ancestrales (roza, tumba y quema) de manejo del fuego para limpiar las parcelas de malezas o de residuos agrícolas, o para promover el rebrote de forrajes en áreas de pastoreo extensivo. En condiciones desfavorables, estas prácticas pueden originar grandes incendios, por ello se requiere transformar las prácticas tradicionales, con el fin de eliminar en forma progresiva el uso del fuego; y es que las condiciones propicias para un incendio pudieran presentarse con frecuencia creciente, debido al proceso global del cambio climático.

Los incendios forestales son ocasionados en su gran mayoría por actividades humanas, con un porcentaje entre el 90 y el 95%, y el resto de causas naturales, la intensidad de la radiación solar principalmente y los de tormentas eléctricas que son más raros y ocurren en temporada de lluvias. Otras causas de los incendios pueden ser:

- El vidrio y los rayos solares, que provocan el “efecto lupa” y puede generar el fuego.
- Una chispa del mofle de un vehículo.
- Tirar cigarros o cerillos encendidos al borde de una carretera.
- Dejar una fogata mal apagada.

Según la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap); las causas de los incendios forestales establecidas en los resultados de la temporada de 1997 fueron las siguientes:

Causas	% de Ocurrencia
Actividades humanas no intencionales	86.30
• Actividades agropecuarias	51.80
• Actividades silvícolas	3.40
• Otras actividades productivas	2.70
• Derechos de vía	1.00
• Fumadores	13.00
• Fogatas	12.50
• Basureros	1.90

Causas	% de Ocurrencia
Actividades humanas intencionales	8.10
• Litigios	4.80
• Para autorización de aprovechamientos	1.70
• Rencillas entre personas o comunidades	0.70
• Cazadores furtivos	0.90
Otras causas	5.60
• Descargas eléctricas	1.40
• Quema de enervantes	0.01
• Transporte ferroviario	0.20
• No determinadas	4.00

Fuente: SEMARNAP 1997

De lo anterior se pueden establecer los siguientes daños ambientales provocados principalmente por los incendios forestales:

- Destrucción de la flora, la fauna y el hábitat de las mismas.
- Empobrecimiento y erosión de los suelos.
- Destrucción de los ciclos del agua y el oxígeno.
- Escasez de agua para cultivo y consumo de las comunidades.
- Contaminación ambiental y destrucción de la belleza del paisaje.
- Destrucción de los ecosistemas.
- Calentamiento de la atmósfera (cambio climático).

2.2. Eventos asociados a los incendios forestales.

La ausencia de humedad, especialmente por falta de lluvia es una de las principales causas que generan la sequía alterando las condiciones climáticas en general. El calentamiento atmosférico, pues debido a la rotación de la tierra, el aire caliente o frío se desplaza de oeste a este. Tal movimiento no siempre obedece a patrones regulares. Cuando la humedad se concentra en los polos, como ocurre en un periodo frío, disminuye en las latitudes bajas. Por esta razón la sequía se asocia no con un calentamiento global como podría pensarse, sino con un enfriamiento global. La sequía ocurre cuando hay un cambio en el patrón de las corrientes de vientos o cuando se concentra el hielo en los polos, concentración que impide a la humedad llegar a una zona determinada. Ahora bien, para

comprender mejor el fenómeno físico de la sequía, Mosiño y García (1966) establecen que hay dos factores que controlan la distribución de la precipitación pluvial en nuestro país:

1. La orografía, factor geográfico permanente, y
2. El relieve, condición necesaria pero no suficiente, que constituye el escenario donde los sistemas sinópticos de tiempo (ciclones, ondas, frentes) se transforman a su paso por nuestro país; de no ser así el relieve condicionaría la prevaencia de la sequía en todo el territorio.

Lo anterior significa que no toda la precipitación se debe a la orografía y que gran parte de ella se debe a las condiciones generales de la atmósfera, asociadas con el movimiento y evolución en tiempo y espacio de las grandes ondas planetarias y de los ciclones tropicales.

En general, se sabe que el flujo aéreo del Este aporta humedad y, por lo tanto, es responsable de la mayor parte de la precipitación durante la estación lluviosa, mientras que el viento superior del Oeste aporta aire seco sobre toda la parte continental de México. Es así que encontramos dos estaciones claramente definidas, una seca y otra húmeda, dependiendo de qué tipo de flujo aéreo predomine. La estación húmeda se extiende de mayo a noviembre. A partir de noviembre, el aire se seca paulatinamente y se instala la época de secas, que en gran parte del país constituye una verdadera sequía y a su vez una temporada idónea para la generación y propagación de incendios forestales, aunados a otros problemas serios como la disponibilidad de agua, entre otros.

La medición del contenido de vapor de agua en la atmósfera es un parámetro muy útil para definir físicamente la estación húmeda de la seca (Galindo, 1995). De prolongarse los vientos superiores del Oeste, las condiciones de sequía continúan. El concepto tradicional de sequía, visto como un déficit de precipitación media o normal, no es un concepto estadístico sino físico, basado en el patrón de flujo de viento y su contenido de humedad. De esta manera, el concepto tradicional de sequía *intraestival* (canícula) es mucho más útil para entender la sequía en nuestro país.

La canícula o sequía intraestival, constituye un mínimo secundario de precipitación que se presenta con frecuencia a mediados de la estación lluviosa, con un receso temporal en la cuantía de las lluvias de esta época (Mosiño y García, 1966). Este fenómeno se extiende en la República Mexicana cubriendo la parte este del país con periodos de duración media de dos a cuatro meses y también de máxima intensidad. Aunque no hay correlación entre la duración de este fenómeno con la cantidad anual de precipitación, si puede existir relación entre la canícula que afecta la parte del valle de Río Bravo y a través de los límites de los estados de Nuevo León y Tamaulipas con las escasas lluvias irregulares, tanto del invierno como del verano.

Dentro de las actividades humanas, en la época de seca, la quema indiscriminada de los campos agrícolas, tales como: los sembradíos de azúcar, la quema de pastizales y, más grave aún, los incendios de grandes regiones boscosas, son causa de un gran deterioro ambiental. Aunque si bien en la época de secas pueden llegar a originarse incendios debido a una gran irradiación solar sobre materia vegetal seca, la acción humana es responsable en gran medida de estos incendios.

El efecto más rápido de los incendios forestales es la inyección súbita a la atmósfera de enormes cantidades de biomasa calcinada en forma de gases y partículas micrométricas que se integran a la atmósfera en forma de aerosoles (Galindo, 1998). Por otra parte, el fenómeno global conocido como El Niño-Oscilación del Sur, cuyas siglas en ingles son ENSO, ocasionalmente durante su segundo año (fase madura) favorece una condición de sequía o ausencia de lluvia denominada La Niña. Esta situación se observó en 1984 al término del evento ENSO de 1982-83 (Galindo, 1995).

2.2.1 El Fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur.

Aunque los incendios forestales ocurren con cierta frecuencia en muchos lugares del mundo, 1998 fue el año en que los incendios forestales alcanzaron enormes superficies de biomasa en muchos países, por ejemplo, Indonesia y otros países del Sur de Asia, los Estados Unidos y desde luego México entre otros. Esta situación se debe en parte al

fenómeno conocido como ENSO. Las estadísticas nacionales y estatales de incendios muestran asimismo esta dependencia respecto de los eventos "Niño".

El evento ENSO de 1997-1998 ha sido el más intenso de los últimos tiempos durante los primeros meses de 1998 se observó la presencia de una sequía prolongada en gran parte del territorio mexicano. En figura 2.2 se observan las condiciones normales y cuando se presenta el "Niño". En estas condiciones, al encontrarse reducido el vapor de agua en la atmósfera, una mayor transparencia atmosférica permitió que se tuviese gran irradiación solar sobre materiales vegetales muy secos, provocando que esta biomasa al calentarse y debido a reacciones fisico-químicas se desencadenaron incendios forestales, tal y como se registraron en ese año a todo lo largo y ancho del territorio nacional.

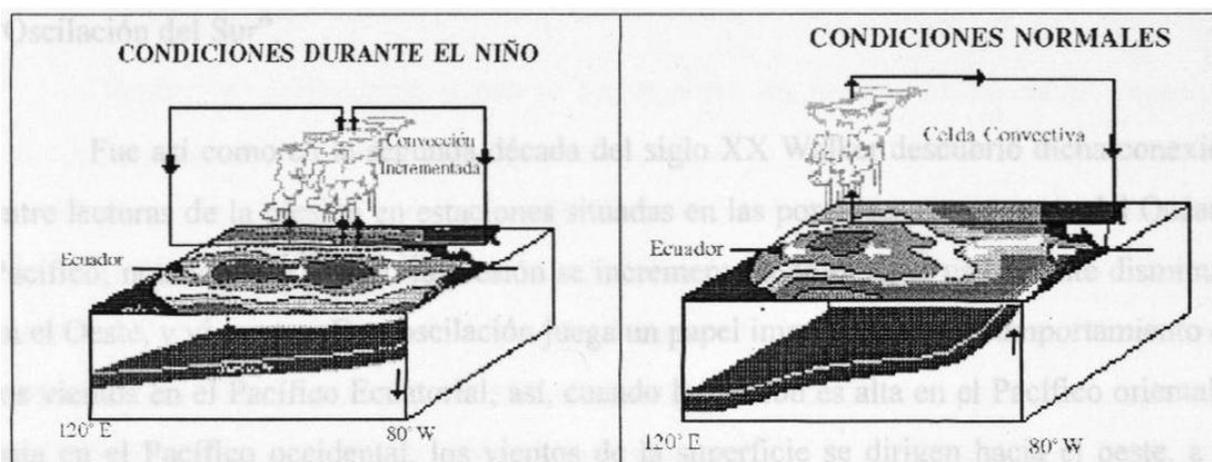


Figura 2.2 Características del fenómeno el Niño-Oscilación del Sur

Fuente: www.noaa.gov

Descripción del Fenómeno Niño.

El término "El Niño" fue usado por primera vez por los pescadores de Perú y Ecuador para referirse a un calentamiento en la superficie del océano que se presenta de manera irregular frente a las costas de ambos países. Frecuentemente alcanza su máximo desarrollo durante el mes de diciembre (de ahí su derivación del término "Niño Dios"). Este fenómeno, con duración de varios meses, provoca una reducción de nutrientes y la correspondiente reducción en la población de peces. A lo largo de los años, el término "El Niño" ha sido usado para designar estos intervalos de fuerte calentamiento de la superficie del mar, que

no solamente afectan el desarrollo de la vida marina, sino que también se considera que altera las condiciones climáticas en una buena parte de la superficie terrestre.

La Oscilación del Sur.

A fines del siglo pasado, Sir Gilbert Walker, nombrado Director General de Observatorios en India en 1904, preocupado por la hambruna en India ocurrida en 1899, cuando los monzones se debilitaron y la actividad previa de sus predecesores desarrollada durante la catastrófica sequía y hambruna de 1877; realizó sus investigaciones sobre las variaciones interanuales de los monzones; documentando la evidencia de que las fluctuaciones interanuales de la presión atmosférica en el Océano Índico y el Océano Tropical del Este se encuentran fuera de fase: "Cuando la presión es alta en el Océano Pacífico, tiende a ser baja en el Océano Índico de África a Australia". A esta fluctuación irregular Walker la designó "Oscilación del Sur".

Fue así como en la segunda década del siglo XX Walker descubrió dicha conexión entre lecturas de la presión en estaciones situadas en las porciones este y oeste del Océano Pacífico; notando que cuando la presión se incrementaba en el Este, usualmente disminuía en el Oeste, y viceversa. Esta oscilación juega un papel importante en el comportamiento de los vientos en el Pacífico Ecuatorial; así, cuando la presión es alta en el Pacífico oriental y baja en el Pacífico occidental, los vientos de la superficie se dirigen hacia el oeste, a lo largo del ecuador, desde las Galápagos hacia Indonesia. A esta condición se le conoce como "índice alto" (fuerte gradiente). Cuando la presión oscila hacia una condición de "índice bajo" (débil gradiente), los vientos de superficie (alisios) se debilitan. Walker observó que la temporada de monzones -lluvias torrenciales de verano- en Asia, en condiciones de índice bajo se asociaba a menudo con sequías en Australia, Indonesia, India y partes de África y con inviernos suaves o moderados en el oeste de Canadá.

No fue sino hasta la década de los 60's cuando se estableció la relación entre "El Niño" y la "Oscilación del Sur". Así, el profesor Jacob Bjerknes de la Universidad de California fue el primero en percatarse de la conexión entre el inusual calentamiento de la superficie del mar, el debilitamiento de los vientos alisios, y las lluvias torrenciales que

acompañan condiciones de bajo índice en el Pacífico ecuatorial. Actualmente la relación entre la Oscilación de Sur y El Niño a menudo es referida como el ENSO (El Niño Southern Oscillation) o FENOS (Fenómeno El Niño Oscilación del Sur).

Impactos Ambientales y de Infraestructura.

El Niño ha afectado indirectamente la salud de los individuos como consecuencia de su impacto en la infraestructura y el ambiente, habiéndose manifestado de diversas maneras (inundaciones y sequía). Por el exceso de lluvias los ríos y lagos se han salido de sus riberas causando inundaciones y contaminación del agua potable. Se ha observado el colapso de sistemas de drenaje de aguas negras. La recolección y eliminación de la basura no ha sido efectuadas en el tiempo y en forma oportuna, debido a la destrucción y/o anegamiento de carreteras, equipos y otras instalaciones.

Durante los períodos de sequía se incrementan los riesgos de incendios, causando con ello la pérdida de zonas verdes, propiedades, ganado y vidas humanas, incrementando la contaminación del aire por suspensión de partículas sólidas. Cuando se presenta un fenómeno El Niño, llueve en el Pacífico oriental y donde soplan los monzones el clima es seco en el Pacífico occidental. A diferencia de las variaciones climáticas anuales, que son predecibles, El Niño se presenta en intervalos irregulares cada dos a siete años, siempre con características diferentes. Por lo general comienza cerca de la Navidad y dura de 12 a 18 meses. El episodio más grave registrado hasta la fecha ocurrió en 1982-1983. Desde entonces hubo otro en 1986-1987 y uno prolongado que duró desde 1990 hasta 1995.

La Niña, la fase fría del fenómeno de El Niño, describe una situación de bajas temperaturas en la superficie del Océano Pacífico ecuatorial, oriental y central. En el Pacífico occidental, La Niña incrementa la precipitación pluvial.

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN TIEMPO REAL MEDIANTE IMÁGENES NOAA-AVHRR Y S.I.G.

Aspectos Generales.

En materia de protección, todos los años, durante el estiaje, los incendios forestales intencionales o no, constituyen el mayor factor de riesgo y perjuicio que causan daños considerables no sólo a diferentes estratos del bosque sino, también a la diversidad biológica. Por otra parte, el advenimiento de tecnologías de punta, probadas y mejoradas desde 1998 por el CUICA de la Universidad de Colima, (Galindo y Solano, 1999) permite una detección en tiempo real de los incendios forestales a nivel nacional propiciando una rápida respuesta en el combate de los incendios.

3.1 Firma espectral de la vegetación

Los radiómetros instalados a bordo de los satélites meteorológicos dedicados a la observación de la Tierra miden la cantidad de radiación reflejada o emitida por ésta. Para cada punto observado del terreno o píxel, la cantidad de radiación reflejada o reflectancia se mide en varias bandas espectrales. El número de bandas y su anchura determinan su resolución espectral (ver sección 3.2). Los distintos tipos de coberturas terrestres (bosques, suelos cultivados, láminas de agua, etc.) se distinguen por la energía que reflejan y emiten. Estos espectros que caracterizan el tipo de cubierta observada constituyen su **firma espectral**.

Radiometría:

Se puede establecer la definición de radiancia como el cociente entre la intensidad luminosa emitida por una superficie y el área aparente de la misma, para un observador lejano. La radiancia se expresa en unidades de wátios /sterorradian A m². La radiancia de una superficie depende de la longitud de onda λ de la luz. Por ello se define la radiancia espectral $L(\lambda)$ para una longitud de onda dada como:

$$L(\lambda) = \frac{\Delta I(\lambda) \cos \theta}{\Delta A} \quad \text{Ecuación (3.1)}$$

Siendo θ el ángulo formado por la normal a la superficie radiante y la dirección considerada. La lectura del radiómetro es proporcional a la radiancia del blanco observado, es decir a la intensidad de la radiación en la dirección de observación y por unidad de superficie aparente del blanco. Si la superficie observada por el radiómetro es homogénea, el resultado de la medición es independiente de la distancia del radiómetro a la superficie y de las dimensiones del campo de observación. Por ello la radiancia es una magnitud fundamental en la detección en tiempo real.

La reflectancia R de una superficie se define físicamente como el cociente entre la potencia de la radiación reflejada y la potencia total recibida por la misma. Dado que la cantidad de radiación reflejada por la superficie siempre será menor o igual que la potencia recibida, la reflectancia tendrá valores comprendidos entre 0 y 1. Normalmente suele expresarse en porcentaje (Alonso *et al* Short, 1997). La reflectancia es una magnitud característica del medio y por tanto es la base para el reconocimiento de espectros vegetales; al igual que la radiancia, la reflectancia también depende de la longitud de onda.

Por lo anterior, se puede establecer que la *Firma Espectral de la Vegetación* se caracteriza por presentar un claro contraste entre las regiones del espectro correspondiente al rojo visible y al infrarrojo cercano (Lobo, 1995). Mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la luz que reciben, en el infrarrojo cercano estas sustancias son bastante transparentes. Por esta razón, la vegetación sana ofrece baja reflectividad en la banda roja del espectro (entre 600nm y 700nm) y alta reflectividad en el

infrarrojo próximo (entre 800nm y 1000nm), de manera que cuanto mayor sea el vigor que presenta la vegetación, mayor será el contraste entre los valores de reflectancia captados en ambas bandas. Bajos valores de reflectancia en el infrarrojo cercano pueden indicar una vegetación enferma o con falta de humedad y por tanto propicia para generar focos calientes que pudieran ser indicativos de condiciones ideales para la gestación de un incendio forestal.

3.1.1 Características Básicas de la Imagen de Satélite

Las características básicas de una imagen digital son:

a) **Resolución Espacial.** La resolución espacial (ppp = puntos por pulgada o dpi = *dots per inch*) es el número de elementos de imagen (píxel) en que se descompone la imagen digital por pulgada. Cuanto mayor sea este valor, mayor será la resolución de la imagen. Una resolución de 300 ppp es adecuada en la mayoría de las aplicaciones; sin embargo, esto irá en función del estado del documento original. No hay que confundirla con la resolución de los dispositivos, la cual es una medida del número de píxeles que representan la imagen en un dispositivo de salida como monitor o impresora.

b) **Profundidad Espectral.** El número de bits reservado para representar la amplitud en cada píxel se denomina profundidad espectral. Mientras más amplio sea el intervalo de números para describir un nivel de señal, más sutiles serán las variaciones que se podrán representar. Mientras mayor sea el número de bits, mayor será el número de valores de amplitud discretos que se podrá representar. Por ejemplo; 1 bit representa dos valores posibles, cero o uno; 2 bits $2^2 = 4$ valores, 3 bits $2^3 = 8$ valores en escala de grises, 4 bits $2^4 = 16$ valores, 8 bits $2^8 = 256$ valores, 24 bits $2^{24} = 256^3 = 16,7$ millones de valores en escala de grises si es monocromo o bien 256 niveles de rojo más 256 niveles de verde más 256 niveles de azul, lo que representa 16,7 millones de colores distintos por cada píxel, paradigma actual en la definición del color. El ojo humano percibiría así en el dispositivo electrónico de visualización de la imagen digital fotorrealismo o calidad fotográfica.

Clasificación de las imágenes

Atendiendo al conjunto de valores que puede tomar cada uno de los píxeles la imagen puede ser de tres tipos:

- **Binaria, de blanco y negro.** Profundidad espectral de 1 bit: blanco, representado por el 1 y negro por el 0.
- **De niveles de gris.** Profundidad espectral de n bits que representan sucesivas gradaciones de intensidad luminosa que van del negro (valor 0) al blanco (valor máximo, que frecuentemente es 256 al venir cada píxel representado por un byte). Es lo que en fotografía se denomina blanco y negro. Ejemplo: imágenes digitalizadas procedentes de placas de Rayos X, con un elevado contenido de niveles de grises.
- **Multiespectrales.** Correspondientes a diferentes intervalos de radiación electromagnética. Las imágenes de color son un caso concreto de las imágenes multispectrales, en donde el espectro de radiación corresponde al visible, único que puede ser detectado por el ojo humano. Los diferentes colores se componen por combinación del primario rojo, verde y azul (*red, green and blue, RGB*). No confundir con las imágenes pseudocoloreadas que son monobanda. Las imágenes tomadas por cámaras y escáneres multispectrales a bordo de satélites y aviones generan imágenes formadas por gran número de bandas (doce o más).

Por su representación espacial, las imágenes se clasifican en:

- **Imágenes planas:** se capturan como objetos planos generalmente en soporte de papel mediante escáneres y tabletas digitalizadoras. Pueden ser binarias (lo que convencionalmente se denominan documentos), en escala de grises (transparencias, diapositivas monocromo) o multispectrales color (fotografías).
- **Imágenes volumétricas:** se capturan como objetos reales en sus tres dimensiones con cámaras generalmente de vídeo u otros sensores (fotografía digital) que presentan una interfase con ordenadores provistos de tarjetas digitalizadoras gráficas.

3.2 El radiómetro AVHRR

Los orígenes del AVHRR.

El AVHRR, uno de los instrumentos a bordo de los satélites NOAA de órbita polar, llamado Radiómetro Avanzado de muy Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés). Ha sido producto de diversas versiones; de cuatro y cinco canales, el primero a bordo del TIROS-N y sólo sufrió algunos cambios en el NOAA-6, 9 y 12; el segundo a bordo de los satélites NOAA-7, 8, 10 y 11. Además, los canales térmicos se diseñan y calibran antes del lanzamiento y en el espacio, para proveer directamente la conversión lineal entre los datos digitales y la temperatura en grados Celsius (o Kelvin). Como los canales infrarrojos térmicos se perfeccionaron para medir la temperatura en la superficie del mar, su gama es aproximadamente -25 a $+49^{\circ}\text{C}$ para el canal 3, -100 a $+57^{\circ}\text{C}$ para el canal 4 y -105 a $+50^{\circ}\text{C}$ para el canal 5.

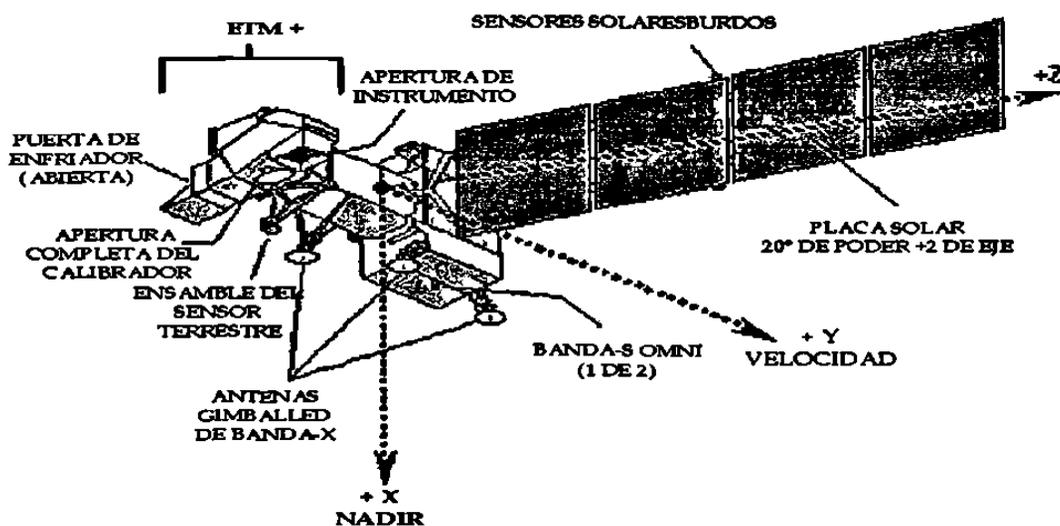


Figura 3.1 Elementos que constituyen un AVHRR

La razón principal para introducir la versión de 5 canales se debe a las correcciones atmosféricas en la determinación de las temperaturas de la superficie del mar. Hastings y Emery (1992) indican que ha sido política de NOAA encontrar los requerimientos de operación de los instrumentos cuya potencialidad se ha probado en el espacio. Los instrumentos que precedieron a los satélites de órbita polar operacionales de verificación se rediseñaron para encontrar los requerimientos científicos y técnicos de la misión, con la finalidad de mejorar la confiabilidad de los instrumentos y la calidad de los datos sin

cambiar los conceptos de medición probados anteriormente. Esta filosofía trae ambos beneficios y desafíos al usuario.

Al principio de los años sesenta había dos radiómetros: Exploración Radiométrica (SR) y el de Muy Alta Resolución (AVHRR). Cada uno de estos instrumentos operaba un canal en la longitud de onda infrarroja visible y térmica, cuyo rendimiento era desconocido con datos analógicos. Hacia 1970 se decidió, por una iniciativa de la NASA/NOAA, construir uno nuevo y mejor. Este explorador que luego llegó a ser conocido como AVHRR se diseñó y construyó por ITT Aeroespacial. En 1976 ITT produjo un modelo de ingeniería para el lanzamiento del instrumento y primero de la serie en el espacio conocido como TIROS-N. Los instrumentos subsecuentes de la serie han sido construidos por ITT Aeroespacial bajo contrato de la NASA que a la vez procuraron el nombre de NOAA a los instrumentos. Las dos series de instrumentos AVHRR de cuatro y cinco canales AVHRR/1 y AVHRR/2 respectivamente; no fueron diseñados específicamente para efectuar trabajos de radiometría, sino para usarse como un radiómetro para imágenes con propósitos meteorológicos. Es a partir de su calibración en unidades absolutas que el AVHRR puede hacer determinaciones físicas cuantitativas. Esta afortunada coincidencia pronto se vio reflejada en aplicaciones novedosas e independientes de su función primaria.

Construcción del Instrumento.

Los detalles de la construcción del AVHRR están en los diversos informes de ITT a la NASA, sin embargo se puede mencionar de acuerdo con Lauritson (1979) que el instrumento tiene dimensiones totales de aproximadamente 25cm por 36cm y un peso de 27kg y consume 25vatios.

El instrumento tiene un espejo que gira en la dirección este-oeste (Fig. 3.2), escudriñando el horizonte: La máxima resolución espacial del instrumento AVHRR es de 1.1 Km cuando la vista se encuentra dentro del nadir, pero a una distancia angular de 55° del nadir la resolución real en la superficie varía de 2.5 a 6.5 Km. Al elemento mínimo de muestreo se llama píxel, luego un píxel a máxima resolución será de 1.1 Km (Galindo y Cruz, 1999) El instrumento ha sido diseñado de tal forma que existe un importante traslape

de los píxeles lejanos al nadir causando que las observaciones en ese punto sean altamente redundantes. Mediante este mecanismo las señales espectrales de cada canal son recibidas simultáneamente (Ver Figura 3.3).

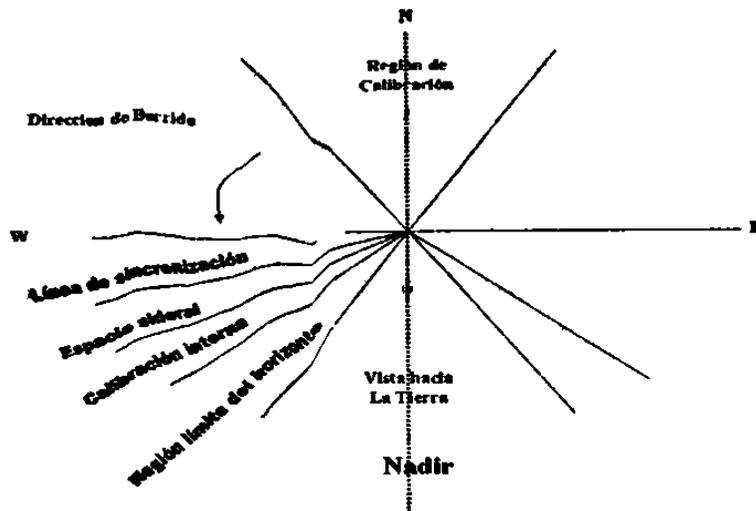


Figura 3.2 Dirección de barrido del espejo del radiómetro AVHRR

El radiómetro AVHRR es un sensor pasivo de cuatro (AVHRR/1) o cinco (AVHRR/2) bandas o canales espectrales, como se muestra en la tabla 3.1. Dado que la resolución espacial en el nadir es de 1.1km, la banda extra en el AVHRR/2 (banda 5) proporciona una mejora en la corrección atmosférica de temperaturas de mar y tierra. Las imágenes AVHRR (5 minutos de datos como media), cubren un área de aproximadamente 3000 X 3000km

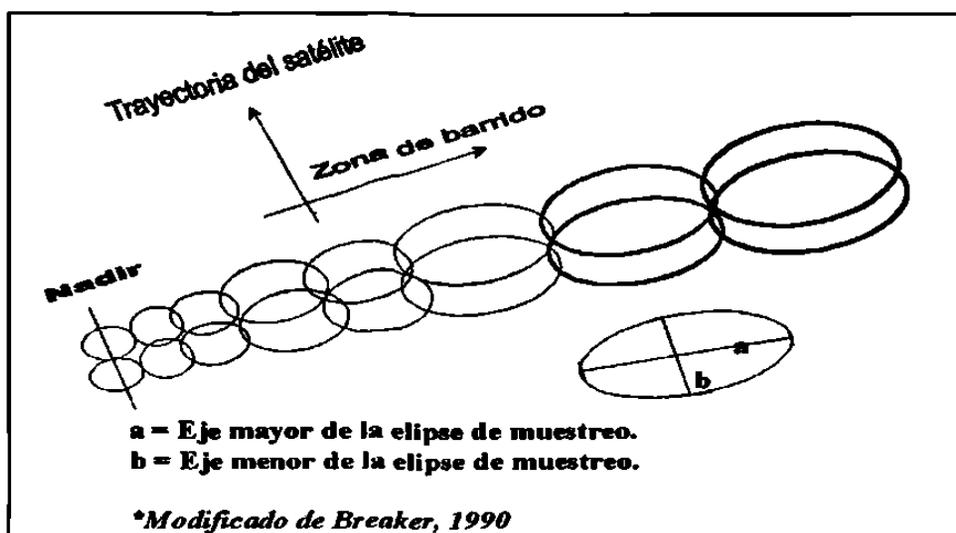


Figura 3.3 Geometría de un píxel de AVHRR y su deformación del nadir.

TABLA 3.1- Canales espectrales que conforman el Radiómetro AVHRR embarcado en los satélites NOAA.

CANAL	BANDA (μm)	REGIÓN ESPECTRAL, RADIACIÓN
1	0.55 - 0.68	Solar visible, reflejada
2	0.72 - 1.10	Solar infrarrojo cercano reflejada
3	3.53 - 3.93	Infrarrojo mediano, reflejada y emitida
4	10.3 - 11.3	Infrarrojo térmico, emitida por la superficie
5	11.5 - 12.5	Infrarrojo térmico, emitida por la superficie

3.3 Los Satélites Meteorológicos de Orbita Polar de la NOAA

Se puede establecer que la era espacial del planeta Tierra, se inició con *El Año Geofísico Internacional* de 1957, evento que revolucionó las Geociencias en el mundo entero, incluyendo nuestro país. El 4 de octubre de 1957, los Soviéticos lanzaron exitosamente el primer satélite, llamado “Sputnik”. Esto motivó que los norteamericanos, sólo 123 días después lanzaran, exitosamente también el satélite llamado “Explorer” el 31 de enero de 1958.

La creación de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) el 1 de octubre de 1958, fue de gran trascendencia para los vuelos espaciales en general y de manera particular para la meteorología por satélites. El primer satélite con instrumentación meteorológica a bordo fue el *Vanguard 2*, lanzado el 17 de febrero de 1959. Desafortunadamente hubo problemas técnicos y la información tuvo que desecharse. Después de varios intentos fallidos, el 1 de Abril de 1960 se logró colocar el primer satélite dedicado completamente a la meteorología satelital llamado *TIROS 1* (Satélite de Televisión y Observación Infrarroja). Varias generaciones de satélites TIROS pasaron para llegar finalmente en 1966 a colocar satélites meteorológicos operacionales llamados ESSA 1 a 9.

La Administración Nacional del Océano y del Aire (NOAA, National Oceanographic and Atmospheric Administration) ha puesto en funcionamiento su serie de satélites NOAA de órbita polar, los cuales llevan una serie de sensores atmosféricos como

el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR). Aunque este instrumento no fue diseñado específicamente para efectuar trabajos de radiometría sino que su diseño fue para usarse como un radiómetro para imágenes con propósitos meteorológicos, es a partir de su calibración en unidades absolutas que el AVHRR puede hacer determinaciones físicas cuantitativas. Esta extraordinaria coincidencia pronto se vio reflejada en aplicaciones novedosas e independientes de su función primaria. En la figura 3.4, se muestra el proceso de generación y recepción de datos a través de puntos espectrales. El sensor AVHRR ha demostrado ser muy valioso en una serie de aplicaciones de observación de la Tierra relacionadas con el medio ambiente, tales como:

- Índices Normalizados de Vegetación (NDVI)
- Mapas de Temperatura del Mar (SST).
- Aplicaciones hidrológicas: cartografía de zonas de nieve, extensiones de agua en riadas humedad del suelo.
- Recursos renovables: NDVI, detección y seguimiento de incendios.
- Aplicaciones geológicas: basándose en propiedades absortivas de las distintas litologías, se han obtenido cartografías, litológicos y tectónicos.
- Riesgos naturales: volcanes, terremotos, inundaciones, incendios.
- Aplicaciones marítimas: calidad del agua, turbiedad del agua, mareas negras.
- Aplicaciones Meteorológicas: tormentas, nubosidad, vientos.

Características Orbitales

El primero de la generación actual de satélites NOAA fue el prototipo TIROS-N, lanzado en Octubre de 1978. Desde entonces, han sido lanzados los siguientes satélites:

Satélite	SENSOR	Lanzamiento
NOAA-6	AVHRR/1	Junio de 1979
NOAA-7	AVHRR/2	Junio de 1981
NOAA-8	AVHRR/1	Marzo de 1983
NOAA-9	AVHRR/2	Diciembre de 1984
NOAA-10	AVHRR/1	Septiembre de 1986
NOAA-11	AVHRR/2	Octubre de 1988
NOAA-12	AVHRR/2	Mayo de 1991
NOAA-14	AVHRR/2	Diciembre de 1994

Actualmente, solo tres satélites están en operación: NOAA 12, NOAA 14 y NOAA 15, aunque ya se tiene información del nuevo NOAA 16.

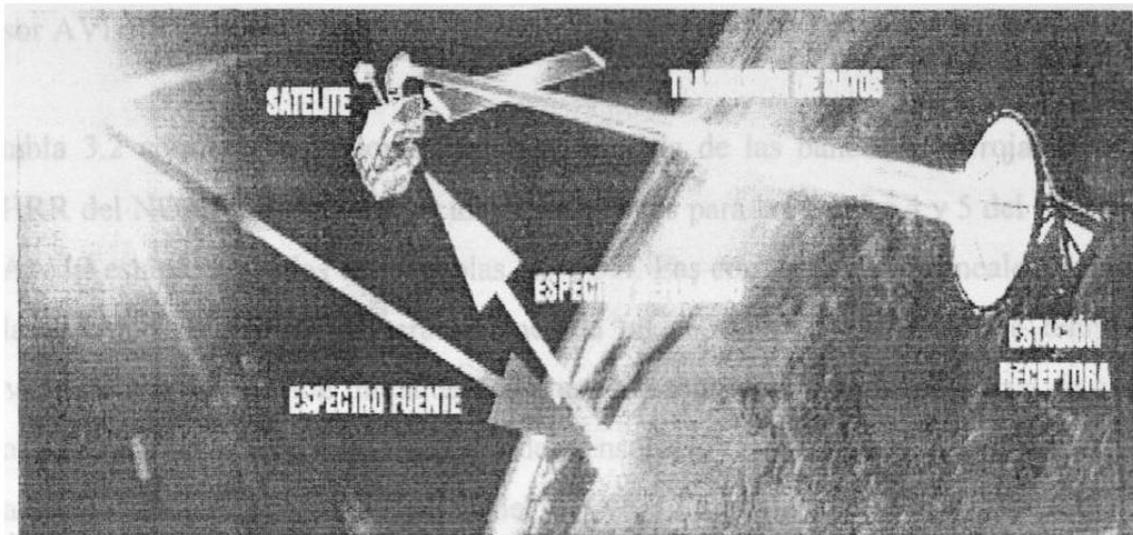


Figura 3.4 Generación de puntos espectrales con información satelital y enviados a una estación receptora.

Los satélites TIROS tienen una órbita circular, polar, sincrónica con el sol, a una altura de aproximadamente 840km a una inclinación de 98.7° a 98.9° . La NOAA mantiene al menos dos satélites operacionales en órbitas complementarias, con uno cruzando el ecuador a horas solares locales de aproximadamente 0730 y 1930, y el otro a las 230 y 1430. Por convenio, los satélites con números pares cubren la "órbita mañanera" (0730) y los impares la "órbita de tarde" (1430) (cosa que no ocurre con el NOAA 14).

El AVHRR es un sensor pasivo de cuatro (AVHRR/1) o cinco (AVHRR/2) bandas. Tiene una banda en la región espectral visible (rojo, $0.55 - 0.90 \mu\text{m}$), una en la infrarroja cercana ($0.72 - 1.0 \mu\text{m}$), una en la infrarroja media ($3.55 - 3.93 \mu\text{m}$) y una/dos en la infrarroja térmica ($10.5 - 11.5/12.5$). La resolución espacial en el nadir es de 1,1 Km. La banda extra en el AVHRR/2 (Banda 5) proporciona una mejora en la corrección atmosférica de temperaturas de mar y de tierra. Las imágenes AVHRR (5 minutos de datos como media), cubren un área de aproximadamente $3000 \times 3000\text{km}$. Sin embargo, debe considerarse que los datos de la banda 3 del sensor AVHRR en la serie de satélites TIROS-N han sido muy ruidosos debido a un problema del sensor y pueden ser inservibles en ocasiones.

3.3.1 Características del Satélite NOAA-12

En funcionamiento desde septiembre 16, de 1991

órbita de mañana: 1930 nodo ascendente, 0730 nodo descendente

Sensor AVHRR: 5 bandas

La tabla 3.2 contiene los valores centrales de onda de las bandas infrarrojas del sensor AVHRR del NOAA 12. Las correcciones no-lineales para las bandas 4 y 5 del AVHRR del NOAA 12 están contenidas en las tablas 3.3 y 3.4. Las correcciones no-lineales se obtienen de la diferencia entre la temperatura medida en el objetivo y esa misma temperatura derivada de una calibración lineal de dos puntos usando una radiancia espacial de cero. La tabla 3.5 contiene la respuesta espectral del sensor TOVS y los coeficientes de corrección de la banda térmica del sensor HIRS/2 del NOAA 12. Las figuras 3.5 a la 3.9 contienen las curvas de respuesta espectral para las bandas 1 a 5 del sensor AVHRR del NOAA 12.

Tabla 3.2 Valores centrales de onda de las bandas infrarrojas del sensor AVHRR del NOAA 12.

Intervalo de Temperatura (K)	Canal 3 (cm ⁻¹)	Canal 4 (cm ⁻¹)	Canal 5 (cm ⁻¹)
190 - 230	2632.713	920.0158	836.6847
230 - 270	2636.669	920.5504	837.0251
270 - 310	2639.610	921.0291	837.3641
290 - 330	2640.817	921.2741	837.5612

Nota: El intervalo de 270 - 310 es aplicable para medir la temperatura de la superficie del mar.

Correcciones no-lineales para las bandas 4 y 5 del NOAA-12.

Tabla 3.3 Correcciones no-lineales del Canal 4 del NOAA-12.

Temperatura de escena (K)	Temperatura de Calibración Interna			
	10°C	15°C	20°C	25°C
320	3.21	2.88	2.27	1.91
315	2.58	2.39	1.72	1.43
305	1.60	1.42	0.80	0.52
295	0.80	0.53	0.13	-0.16
285	0.16	-0.23	-0.52	-0.70
275	-0.41	-0.84	-1.05	-1.19
265	-0.71	-0.97	-1.19	-1.32
255	-1.04	-1.20	-1.53	-1.59
245	-1.18	-1.40	-1.58	-1.62
235	-1.05	-1.59	-1.51	-1.63
225	-1.33	-1.65	-1.58	-1.67
215	-1.24	-1.65	-1.49	-1.53
205	-1.58	-1.80	-1.31	-1.33

Tabla 3.4 Correcciones no-lineales del Canal 5 del NOAA-12.

Temperatura de escena (K)	Temperatura de Calibración Interna			
	10°C	15°C	20°C	25°C
320	0.80	0.80	0.80	0.73
315	0.80	0.80	0.73	0.61
310	0.80	0.73	0.61	0.37
305	0.73	0.61	0.37	0.18
295	0.37	0.18	0.08	-0.08
285	0.08	-0.08	-0.21	-0.31
275	-0.21	-0.31	-0.37	-0.41
265	-0.37	-0.41	-0.47	-0.53
255	-0.47	-0.53	-0.63	-0.76
245	-0.63	-0.76	-0.88	-0.94
235	-0.88	-0.94	-1.01	-1.10
225	-1.01	-1.10	-1.15	-1.19
215	-1.15	-1.19	-1.17	-1.16
205	-1.17	-1.16	-1.19	-1.23

Tabla 3.5 Respuesta espectral del sensor TOVS y Coeficientes de corrección de las bandas térmicas del sensor HIRS/2 del NOAA 12.

Instrumento HIRS/2		Descripción	Coeficientes de Corrección	
Canal	# de Onda Central		B	C
1	667.58 cm ⁻¹	15 micrones	0.007	0.99996
2	680.18 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.007	0.99995
3	690.01 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.019	0.99989
4	704.22 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.026	0.99988
5	716.32 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.021	0.99990
6	732.81 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.140	0.99964
7	749.64 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.019	0.99991
8	900.45 cm ⁻¹	Ventana	0.358	0.99940
9	1026.66 cm ⁻¹	Ozono	0.181	0.99985
10	1223.44 cm ⁻¹	Vapor de Agua	0.377	0.99975
11	1368.68 cm ⁻¹	Vapor de Agua	0.175	0.99992
12	1478.59 cm ⁻¹	Vapor de Agua	0.265	0.99863
13	2190.37 cm ⁻¹	4.3 micrones	0.078	1.00042
14	2210.51 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.017	0.99995
15	2236.62 cm ⁻¹	Banda CO ₂	-0.023	0.99950
16	2267.62 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.021	0.99995
17	2361.64 cm ⁻¹	Banda CO ₂	0.022	0.99997
18	2514.68 cm ⁻¹	Ventana	0.058	0.99992
19	2653.48 cm ⁻¹	Ventana	0.344	0.99950
20	14453.14 cm ⁻¹	Ventana Vis.		
MSU				
Canal	# de Onda Central			
1	1.6799 cm ⁻¹			
2	1.7927 cm ⁻¹			
3	1.8334 cm ⁻¹			
4	1.9331 cm ⁻¹			
SSU				
Instrumento no disponible en el NOAA-12				

Curvas de respuesta espectral de las bandas del AVHRR del NOAA-12.

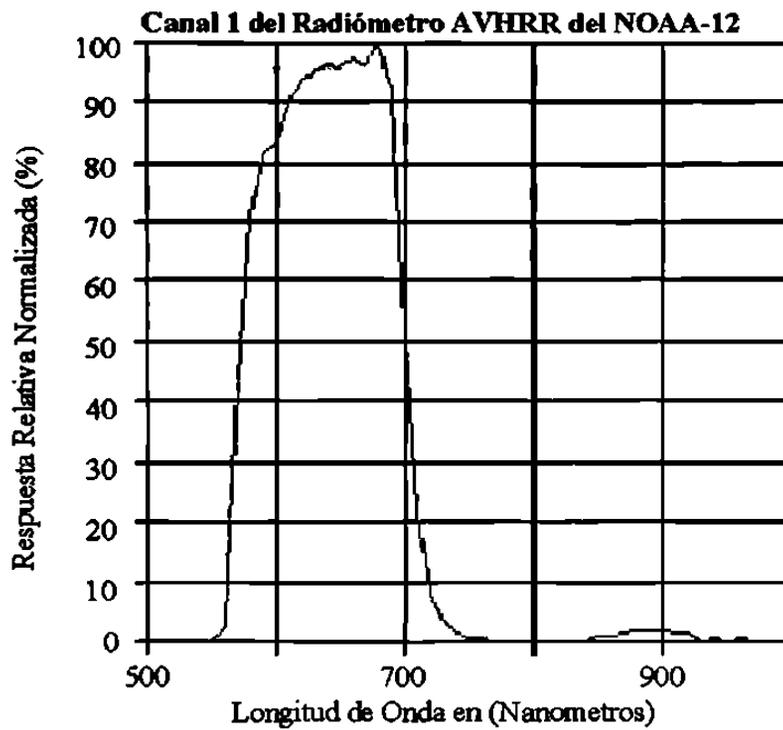


Figura 3.5 Curva de respuesta espectral de la banda 1 del sensor AVHRR del NOAA-12

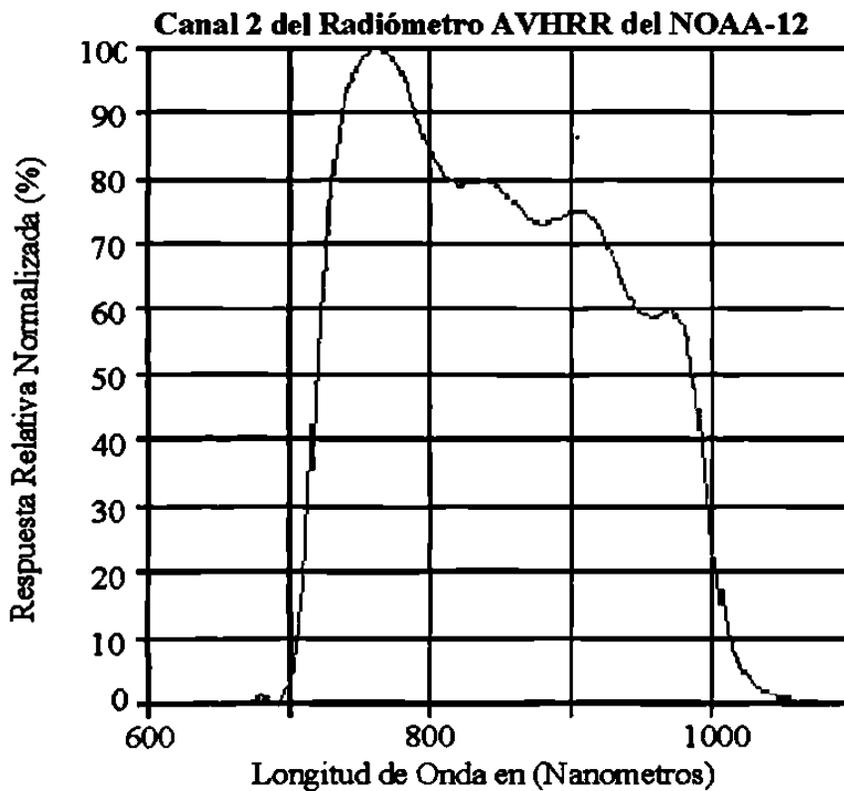


Figura 3.6 Curva de respuesta espectral de la banda 2 del sensor AVHRR del NOAA-12

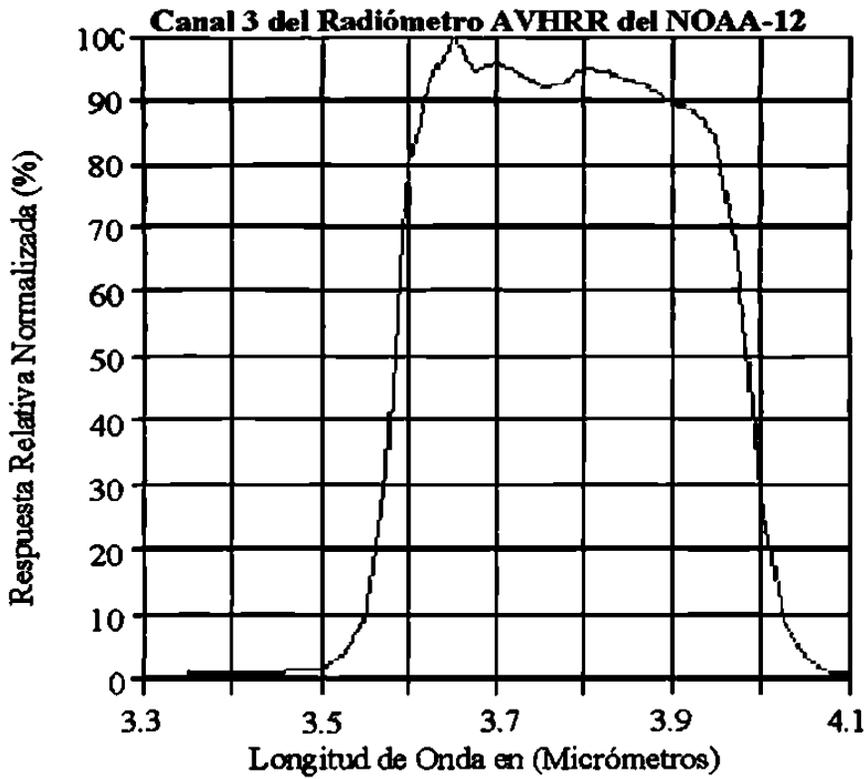


Figura 3.7 Curva de respuesta espectral de la banda 3 del sensor AVHRR del NOAA-12

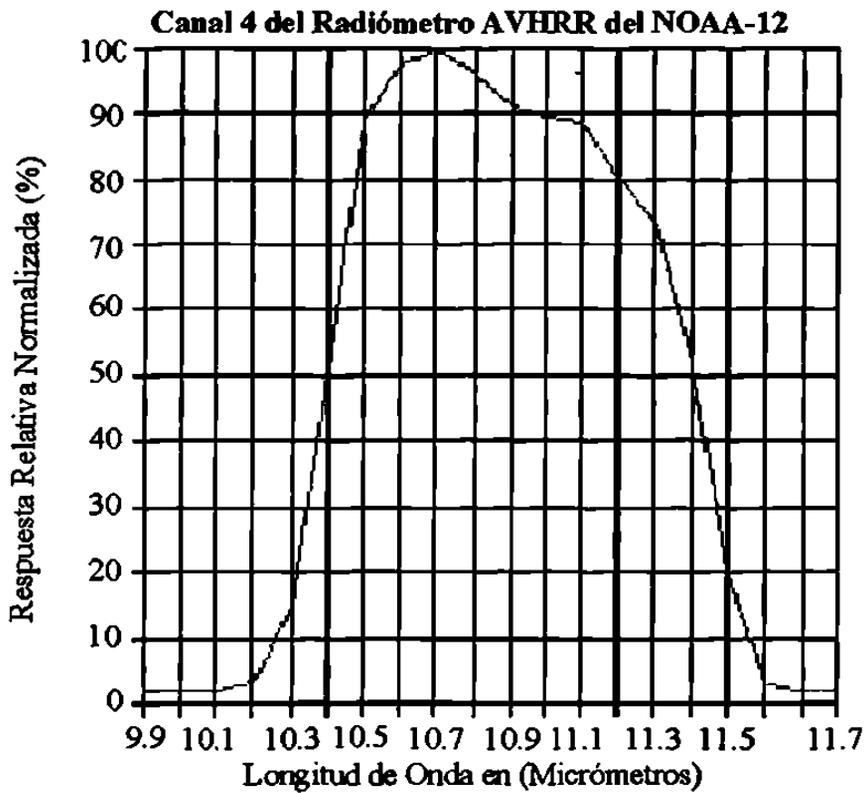


Figura 3.8 Curva de respuesta espectral de la banda 4 del sensor AVHRR del NOAA-12

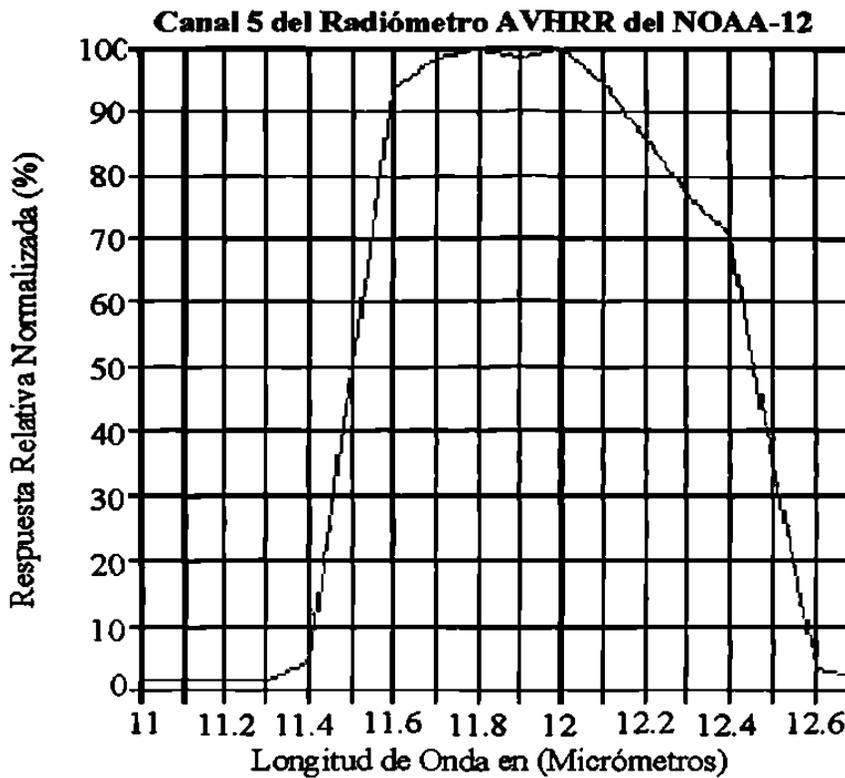


Figura 3.9 Curva de respuesta espectral de la banda 5 del sensor AVHRR del NOAA-12

3.3.2 Características del Satélite NOAA-14

En funcionamiento desde el 30 de diciembre de 1994

Orbita de tarde: 1340 nodo ascendente, 0140 nodo descendente

Sensor AVHRR: 5 bandas

ID del satélite: 3

Anormalidades: el sensor MSU, en el NOAA 14, dejó de funcionar el 3 de marzo de 1995, 0100 GMT, y se puso en funcionamiento de nuevo con éxito el 30 de marzo de 1995.

La tabla 3.6 contiene los valores centrales de onda de las bandas infrarrojas del sensor AVHRR del NOAA 14. La tabla 3.8 contiene la respuesta espectral del sensor TOVS y los coeficientes de corrección de las bandas térmicas del sensor HIRS/2 del NOAA 14.

Con el sensor AVHRR del NOAA 13 (no operativo) ha sido implementado un nuevo procedimiento de corrección de radiancia por la NESDIS que corrige tanto la no-

linealidad de las bandas 4 y 5 del sensor AVHRR como el offset entre el space point observado de la curva de calibración de la banda 3. Como con los sensores anteriores, los coeficientes de calibración ganancia y pendiente para cada banda están incluidos entre los datos del fichero 1b, que permite a los usuarios realizar una calibración lineal. Sin embargo, estos coeficientes se obtuvieron usando una radiancia espacial (R_{SP}) diferente a cero. La R_{SP} es una constante para cada banda y hace las correcciones de radiancia independientes de la calibración interna de la temperatura. Los coeficientes de pendiente y punto de corte en las ordenadas se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$G = \frac{R_T - R_{SP}}{C_T - C_{SP}} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

$$I = R_{SP} - G * C_{SP} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

En donde G es la pendiente, I es el punto de corte en ordenadas, R_T es la radiancia del objetivo, C_T el valor del objetivo y C_{SP} el valor del espacio. Estos coeficientes proporcionan una radiancia lineal (R_{lin}):

$$R_{lin} = G * C + I \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

Este procedimiento de calibración lineal se describe con más detalle en el NOAA Technical Memorandum NESS 107. La siguiente ecuación proporciona una radiancia corregida, RAD , para las bandas 3, 4 y 5 del sensor AVHRR, que es sólo una función de la radiancia lineal obtenida de la ecuación (3.4):

$$RAD = (A * R_{lin}) + [B * (R_{lin})^2] + C \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

En donde C es el valor de la banda.

Esta radiancia puede ser convertida en temperatura usando las tablas de energía o, en su caso, la inversa de la ecuación de Planck con los valores centrales de onda apropiados. No deberá aplicarse ninguna corrección de temperatura adicional. Los coeficientes para aplicar esta ecuación a las bandas 3, 4 y 5 del sensor AVHRR del NOAA 14 se encuentran en la tabla 3.7. Las figuras 3.10 a la 3.14 contienen las curvas de respuesta espectral para las bandas 1 a 5 del sensor.

Tabla 3.6 Valores centrales de onda de las bandas infrarrojas del sensor AVHRR del NOAA 14.

Intervalo de Temperatura (K)	Canal 3 (cm ⁻¹)	Canal 4 (cm ⁻¹)	Canal 5 (cm ⁻¹)
190 – 230	2638.652	928.2603	834.4496
230 – 270	2642.807	928.8284	834.8066
270 – 310	2645.899	929.3323	835.1647
290 – 330	2647.169	929.5878	835.374

Nota: El intervalo de 270 – 310 es aplicable para la temperatura en la superficie del mar.

Tabla 3.7 Coeficientes de corrección de Radiancia para los canales 3, 4 y 5 del AVHRR para el NOAA 14.

	Canal 3	Canal 4	Canal 5
Coeficiente A	1.00359	0.92378	-0.96194
Coeficiente B	0	0.0003822	0.0001742
Coeficiente C	-0.0031	3.72	2.00
Radiancia del espacio, Rsp	0.0069	-4.05	-2.29

Tabla 3.8 Respuesta espectral del sensor TOVS y Coeficientes de corrección de las bandas térmicas del sensor HIRS/2 del NOAA 14.

Canal	Instrumento HIRS/2		Descripción	Coeficientes de Corrección	
	# de Onda Central			B	C
1	668.90 cm ⁻¹		15 micrones	0.002	0.99998
2	679.36 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.000	0.99997
3	689.63 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.011	0.99994
4	703.56 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.001	0.99994
5	714.50 cm ⁻¹		Banda CO ₂	-0.014	0.99997
6	732.28 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.026	0.99989
7	749.64 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.019	0.99991
8	898.67 cm ⁻¹		Ventana	0.067	0.99977
9	1028.31 cm ⁻¹		Ozono	0.050	0.99980
10	796.04 cm ⁻¹		Vapor de Agua	0.021	0.99990
11	1360.95 cm ⁻¹		Vapor de Agua	0.073	0.99971
12	1481.00 cm ⁻¹		Vapor de Agua	0.284	0.99931
13	2191.32 cm ⁻¹		4.3 micrones	0.021	0.99996
14	2207.36 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.020	0.99997
15	2236.39 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.024	0.99998
16	2268.12 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.018	0.99996
17	2420.24 cm ⁻¹		Banda CO ₂	0.026	0.99992
18	2512.21 cm ⁻¹		Ventana	0.042	0.99993
19	2647.91 cm ⁻¹		Ventana	0.313	0.99946
20	14453.14 cm ⁻¹		Ventana Vis.		

MSU

Canal	# de Onda Central
1	1.6779 cm ⁻¹
2	1.7927 cm ⁻¹
3	1.8334 cm ⁻¹
4	1.9331 cm ⁻¹

Continúa tabla 3.8

SSU	
Canal	# de Onda Central
1	669.988 $\text{cm}^{-1}/15 \text{ mb}$
2	669.628 $\text{cm}^{-1}/15 \text{ mb}$
3	669.357 $\text{cm}^{-1}/15 \text{ mb}$

Curvas de respuesta espectral de las bandas del AVHRR del NOAA-14.

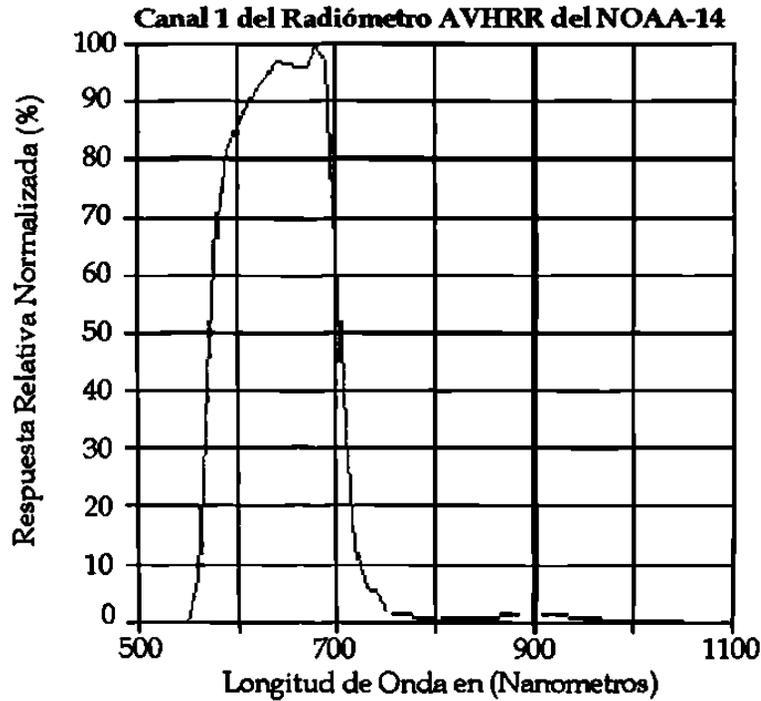


Figura 3.10 Curva de respuesta espectral de la banda 1 del sensor AVHRR del NOAA-14

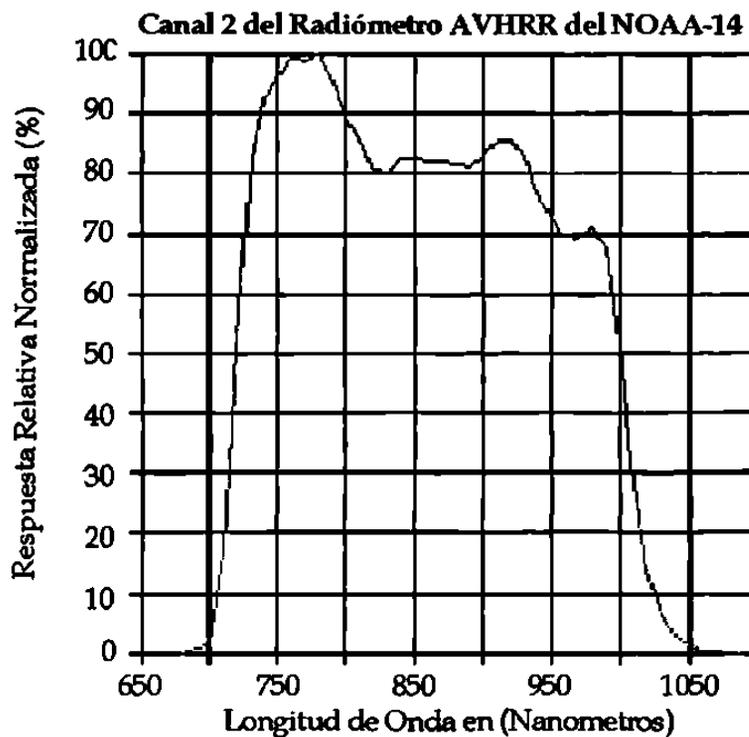


Figura 3.11 Curva de respuesta espectral de la banda 2 del sensor AVHRR del NOAA-14

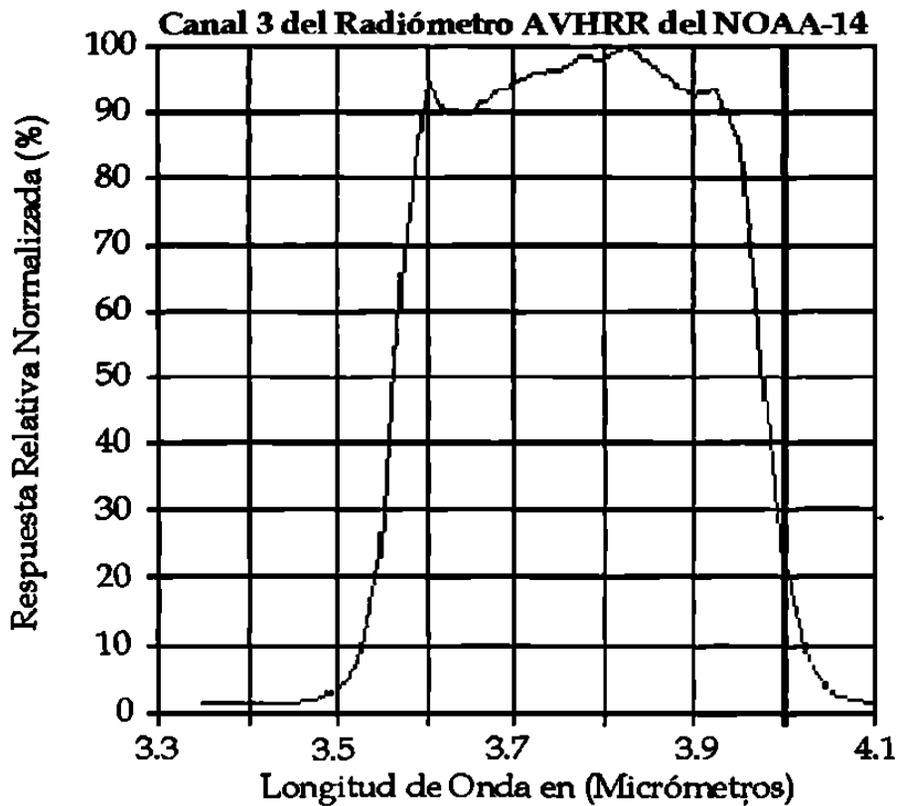


Figura 3.12 Curva de respuesta espectral de la banda 3 del sensor AVHRR del NOAA-14

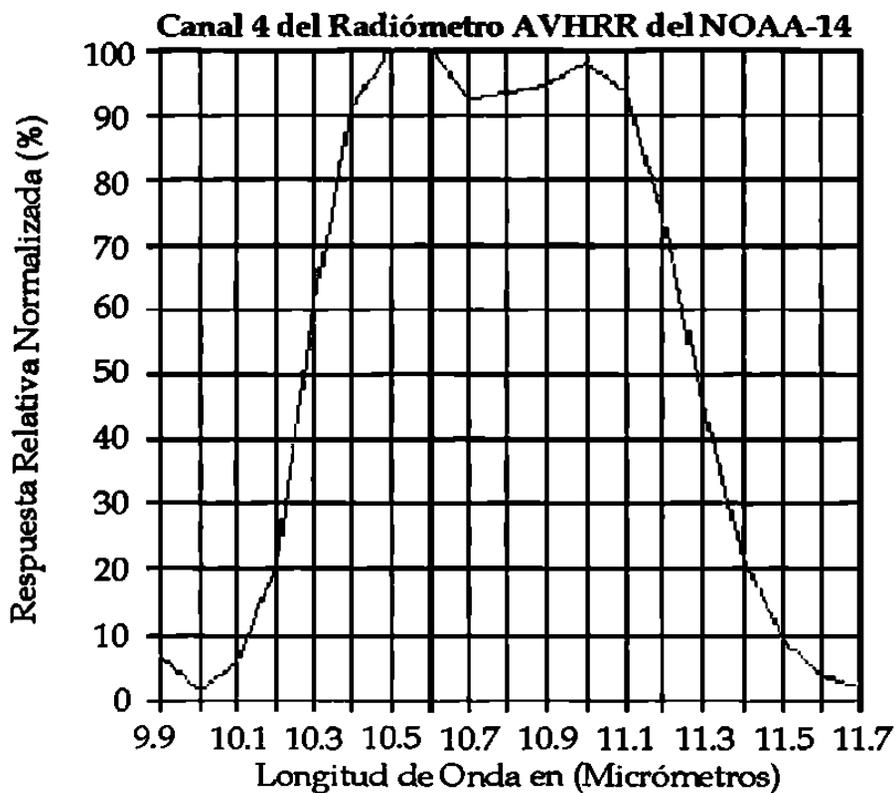


Figura 3.13 Curva de respuesta espectral de la banda 4 del sensor AVHRR del NOAA-14

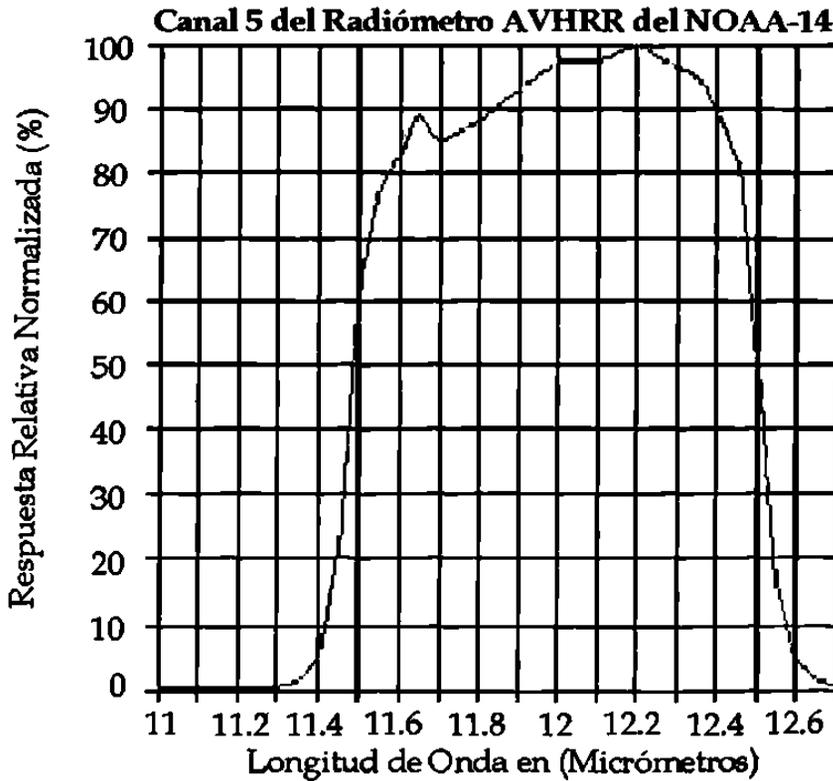


Figura 3.14 Curva de respuesta espectral de la banda 4 del sensor AVHRR del NOAA-14

3.4 Método multiespectral e identificación de puntos calientes.

En 1994, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) aprobó un proyecto de infraestructura presentado por el Dr. Ignacio Galindo de la U. de Colima, para instalar una estación terrena receptora de señales en tiempo real de los satélites NOAA. Estos satélites envían dos imágenes digitales por día. Actualmente están en operación los satélites NOAA 12, 14 y 15; es decir, se reciben seis señales diarias de resolución (1.1km x 1.1km, o sea 121 ha). Los satélites NOAA tienen embarcados varios sensores, entre otros el ya mencionado: AVHRR y el Sistema de Sondeo Vertical Tiros, cuyas siglas en inglés son TOVS. El AVHRR nos informa sobre propiedades ópticas y de emisión térmica de la superficie de barrido mientras que TOVS informa sobre las condiciones termodinámicas de la atmósfera subyacente, incluyendo la temperatura y los vientos a diferentes alturas.

Debido a que las imágenes en bruto presentan distorsiones importantes, se han desarrollado procedimientos de georeferenciación en coordenadas UTM, calibración

radiométrica y correcciones atmosféricas, lo que nos ha permitido disponer de las imágenes tratadas en tiempo casi real. El radiómetro AVHRR proporciona imágenes multiespectrales en los canales que se muestran en la Tabla 3.1. Los dos primeros miden la radiación solar reflejada por el suelo en el visible e infrarrojo cercano, su combinación permite calcular el llamado índice de vegetación, cuyas siglas en inglés son NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Este índice se determina a partir de la ecuación 3.6:

$$NVDI = (CH2 - CH1) / (CH2 + CH1) \quad (3.6)$$

Es decir, el NVDI se describe como el cociente de la diferencia y la suma de los dos canales, el solar visible y el solar infrarrojo. El índice de vegetación está relacionado con la biomasa verde contenida en un píxel de 121 ha y con la radiación fotosintéticamente activa absorbida. También es una medida del estado de humedad de la vegetación. El canal 3 mide la radiación emitida en el infrarrojo medio y los canales 4 y 5 en el infrarrojo térmico. Las imágenes nocturnas son más útiles para trabajar con estos canales, particularmente en la detección de fuentes de calor anómalas. Obviamente, aquellas fuentes de calor constantes como son las fundidoras, mecheros de gas, etc. son identificadas y enmascaradas para evitar contarlas durante la detección de focos calientes de origen vegetal (incendios forestales y/o quemas agrícolas).

Detección de focos activos.

La diferencia de longitudes de onda en las que operan los canales 3, 4 y 5 del AVHRR se puede utilizar para la detección de incendios. De acuerdo con las leyes de la radiación, al elevarse su temperatura, los cuerpos emiten más radiación en longitudes de onda cortas. Por lo tanto se puede esperar que la emisión térmica de un incendio será mayor en el canal 3 que en el 4 ó 5. Esta propiedad de los cuerpos la utiliza el método multiespectral que se ha desarrollado en el CUICA (Galindo *et al* 2001), y es muy semejante al que utiliza la NOAA.

El sistema mencionado permite la detección de incendios forestales en tiempo real y su característica más importante es la determinación automática de umbrales T3-T4 a lo

largo de toda la imagen. Estos umbrales son dinámicos variando de acuerdo con la época del año y la hora del día, para cada una de las seis regiones en que hemos dividido el país. Una vez identificados los píxeles afectados (“puntos calientes”), éstos son llevados a un sistema de información geográfica para ser vaciados sobre la cubierta vegetal del Instituto Nacional de Ecología (INE) lo que permite separar los focos calientes en incendios forestales y quemas agrícolas (figura 3.15 y 3.16). La principal restricción del método lo da la cubierta nubosa densa, afortunadamente cuando ésta se presenta ya las lluvias cubren prácticamente todo el territorio y la incidencia de incendios es mínima. Las imágenes vespertinas y de la madrugada son las más adecuadas para llevar a cabo un tratamiento de las mismas y poder detectar los puntos calientes que son los que se reportan a las diversas dependencias gubernamentales para su verificación y/o combate de incendios en el caso de que así lo sean.

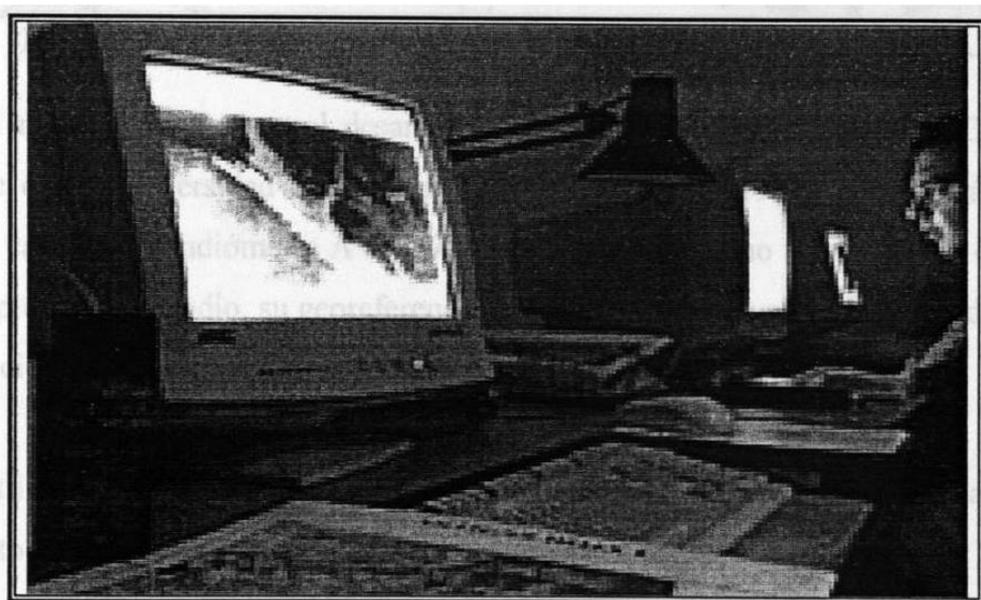


Figura 3.15 Procesamiento de imágenes de satélite en tiempo real

Aunque la detección de incendios forestales usando datos de imágenes satelitales se inició en 1977 cuando Croft (1978) presentó imágenes de incendios agrícolas del África Central; la teoría de monitoreo de incendios utilizando el canal 3 del radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR) fue desarrollada por Dozier (1981) y Matson (1987). Actualmente, se han realizado mejoras en los métodos de detección con la introducción de umbrales de temperatura para el canal 3 con respecto a la temperatura del canal 4

(Christopher, 1998). De manera similar, se ha desarrollado una técnica para estimar por satélite las áreas identificadas como incendio (Cahoon and Stocks, 1992).



Figura 3.16 Estación terrena receptora de imágenes de satélite NOAA.

El método multispectral desarrollado en el Centro Universitario de Ciencias del Ambiente de la Universidad de Colima (Galindo y Solano, 1999), utiliza prácticamente todos los canales del radiómetro AVHRR. El método tiene como finalidad una descripción más completa del incendio, su georeferenciación, su ubicación, una estimación del área y la identificación del humo.

Utilizando este método se ha integrado una base de datos a escala nacional que contiene todos los incendios que han ocurrido desde enero de 1998 a la fecha. El presente trabajo de investigación ha permitido (con la base de datos y particularizando en el Estado de Nuevo León) conocer con mayor certidumbre los mecanismos de iniciación de los incendios y aportar resultados sobre las perturbaciones climáticas temporales producidas por la bruma originada por el humo de los incendios forestales. Desde el punto de vista operativo estos resultados son una base para una mejor prevención de los incendios forestales en áreas de gran diversidad biológica, de interés científico, tecnológico, etc.

De igual forma resulta importante la comparación del número de incendios reportados por las brigadas de combate, con el número de píxeles detectados como puntos

de calor y traducido en incendio por medio de las imágenes AVHRR. Según los resultados y comparaciones que se presentan en las secciones 4.2 y 4.3 existen discrepancias numéricas de mes a mes, entre los que detectó el satélite, aparentemente, y los reportados. Algunas de las posibles causas de las diferencias son:

- a) El método multispectral de detección de incendios con imágenes AVHRR, es decir los datos que aporta el satélite requieren ser georeferenciados o ajustados a las coordenadas reales del punto geográfico del incendio. Este problema se pudo resolver con la utilización de sistemas de información geográfica que se explican con mayor detalle en el siguiente apartado de este trabajo de investigación.
- b) El desplazamiento cotidiano del satélite, de Este a Oeste puede dar una insuficiente cobertura del área en estudio
- c) Obstrucciones al campo de visión del satélite, por ejemplo la nubosidad, que impide la detección de los puntos de calor en la superficie.
- d) Otra causa reportada por Cracknell (1997), menos frecuente, es cuando la pluma de humo se levanta verticalmente formando una nube densa y oscura. Según este autor, esta situación se presenta en la quema de pastizales en los trópicos húmedos. Nosotros no la hemos observado.

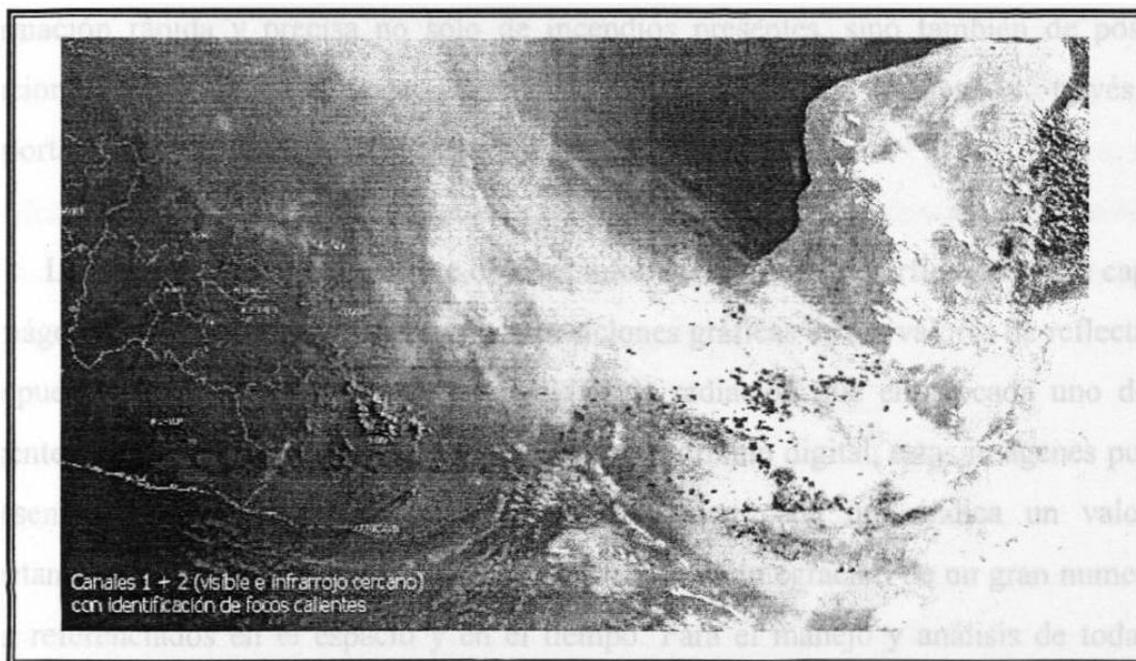


Figura 3.17 Detección de incendios forestales en tiempo real a partir de puntos calientes con imágenes NOAA-AVHRR

Podemos señalar entonces que en México se dispone de una metodología para detectar en tiempo real los incendios forestales (figura 3.17). La efectiva comunicación entre el CUICA de la Universidad de Colima con la Subsecretaría de Ecología del Estado de Nuevo León y SEMARNAT, permitirá combatir los incendios con mayor rapidez reduciendo los riesgos inherentes. Otro factor de gran importancia es la retroalimentación que debe existir entre quienes detectamos a través de tecnología satelital los incendios y las brigadas de combate en el campo.

3.5 Determinación de incendios forestales a partir de puntos calientes mediante sistemas de información geográfica

En nuestro país, como ya se mencionó con anterioridad, los incendios forestales son uno de los mayores problemas medioambientales por su elevada frecuencia e intensidad. La mejora de los sistemas de detección, prevención y combate de los incendios, la cartografía de áreas afectadas por el fuego y el estudio y análisis posterior de las masas vegetales quemadas, son objetivos primordiales en la lucha para aminorar sus efectos. La detección en tiempo real con imágenes de satélite utilizando el radiómetro AVHRR, permite obtener información rápida y precisa no sólo de incendios presentes, sino también de posibles situaciones que pudieran estar alterando las condiciones locales, a través del comportamiento espectral de la cobertura vegetal.

La percepción remota permite obtener información de la superficie terrestre captada en imágenes satelitales, las cuales son composiciones gráficas de los valores de reflectancia o respuesta espectral, es decir, de la cantidad de radiación que emite cada uno de los diferentes objetos presentes en un área definida; en formato digital, estas imágenes pueden representarse como matrices de números en las que cada uno indica un valor de reflectancia. La gestión de recursos forestales requiere la integración de un gran número de datos referenciados en el espacio y en el tiempo. Para el manejo y análisis de toda esta información los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son en la actualidad una herramienta imprescindible en la toma de decisiones respecto al manejo de los recursos,

siendo especialmente interesantes en la valoración de los recursos forestales (inventario, seguimiento y determinación de incendios, plagas y enfermedades de las plantas) y en el manejo de los recursos (análisis, modelación y predicciones para la toma de decisiones de gestión).

Los recursos forestales constituyen un ámbito cuya gestión requiere la integración de datos referidos tanto a la realidad presente como a las previsiones futuras y, en algunos casos, a las existencias en el pasado. En esta tarea los SIG se manifiesta como una herramienta de trabajo clave, ya que forma un sistema único capaz de combinar ambas necesidades. El uso de los SIG en relación con los incendios forestales tiene aplicaciones en varios aspectos como la prevención, detección, control y seguimiento de la evolución de los mismos. Las imágenes obtenidas con el AVHRR del NOAA son la fuente principal de información espacial para este tipo de desastres. Uno de los SIG utilizados particularmente para estos estudios es el ARC-VIEW, que con la combinación de la cubierta vegetal del Instituto Nacional de Ecología (INE) puede llevar a cabo una evaluación de las condiciones en tiempo real del área de estudio.

En la detección de incendios forestales a través de imágenes satelitales debe considerarse, además de la magnitud del evento, la zona afectada y establecer con ello si se trata de áreas naturales protegidas o zonas de gran diversidad ecológica. La importancia y trascendencia de la ubicación de un incendio forestal es fundamental si se toma en cuenta los efectos e impactos al medio ambiente y a su biodiversidad; ya que los problemas pudieran multiplicarse con el desplazamiento de especies o en su caso a la pérdida de bosques y maderas preciosas entre otros muchos aspectos.

3.5.1. Sistemas de información geográfica (S.I.G.)

Últimamente, una nueva palabra parece enseñorearse de muchas conversaciones sobre tratamientos de la información: geomática. Geomática es un concepto acuñado en Canadá, país líder en el desarrollo de tecnologías de computación aplicadas a la geografía, para definir un conjunto de disciplinas que unen sus fuerzas para impulsar una revolución

tecnológica en una de las ciencias más antiguas: la Geografía. Hoy en día y desde diversas organizaciones se invierten grandes sumas de dinero en el desarrollo de bases de datos georeferenciados y en sistemas de información geográfica (SIG).

Una definición precisa y completa de un SIG podría ser la de un conjunto de equipos informáticos, de programas, de datos geográficos y técnicos organizados para recoger, almacenar, actualizar, manipular, analizar y presentar eficientemente todas las formas de información georeferenciada. Los sistemas de información geográfica son el resultado natural de la evolución de las ciencias de la computación y la electrónica las máquinas personales de hoy pueden manejar con mayor comodidad los grandes volúmenes de datos asociados con la información geográfica. Un SIG es un híbrido entre los sistemas de diseño asistido por computadora CAD y los productos tradicionales de bases de datos en su verdadero contexto espacial, proporcionando de forma cómoda información en una interfase con alto impacto visual y gran capacidad de síntesis informativa. Por ejemplo, no es lo mismo leer un listado (aunque esté ordenado por calles) de números telefónicos para encontrar los del proveedor que buscamos, que ver un mapa de nuestro barrio o colonia donde los teléfonos, por tipo de proveedor se encuentran reflejados como símbolos de diferentes formas y/o colores. Esto nos permite de forma muy intuitiva y rápida seleccionar inmediatamente el más cercano a nuestro domicilio. Al apuntar con el “ratón” aparece toda una pantalla con la lista de todos los datos de información que necesitamos sobre dicho proveedor.

Las aplicaciones de los SIG incluyen todas aquellas en que es necesario manejar información que se encuentra distribuida en el espacio físico, el mundo en que vivimos. La relación estrecha que se establece entre los mapas digitales y la información asociada a los elementos gráficos que contienen éstos, da una nueva dimensión al tratamiento de la información.

El desarrollo de las ciencias espaciales también permite que por primera vez en la historia humana se cuente con fotografías del globo terráqueo “desde afuera”. Existen satélites especialmente diseñados para este propósito que transmiten periódicamente a la

Tierra imágenes digitalizadas, que con ayuda del software adecuado pueden interpretarse y ser utilizadas en muchas aplicaciones, tales como:

- a) Actualización de mapas.
- b) Supervisión del desarrollo de plagas o enfermedades vegetales en amplias áreas.
- c) Planificación de talas y reforestación en bosques.
- d) Seguimiento de derrames de petróleo en el mar.
- e) Detección y seguimiento oportuno de incendios forestales.
- f) Evaluación de alguna dispersión de contaminantes.
- g) Estudio de evolución de hábitat naturales con el paso del tiempo.
- h) Estudio de erupciones volcánicas.
- i) Prospección y administración de recursos naturales. Etc.

¿Qué se puede hacer con un SIG?

1. **Ubicar:** ¿Que hay en..?. Esta pregunta requiere encontrar qué existe en una localidad particular, la cual puede ser descrita por: su nombre, su código postal, referencia geográfica, etc.
2. **Condición:** ¿Dónde está...?. Esta pregunta es la inversa de la anterior y requiere de un análisis espacial para ser respondida. En lugar de buscar qué existe en cierta ubicación, se requiere encontrar las localidades en las cuales existen ciertas características.
3. **Tendencias:** ¿Qué ha cambiado desde...?. Ésta a su vez implica responder las dos anteriores y encontrar las diferencias en dos instancias de tiempo para la zona en estudio.
4. **Patrones:** ¿Qué patrones espaciales existen?. Esta pregunta no se responde directamente, sino que requiere del análisis de los datos geográficos.
5. **Modelado:** ¿Qué sucedería sí...?. Este tipo de preguntas también requieren de un análisis de los datos y permite encontrar los posibles escenarios con el cambio de algunas variables geográficas.

Esquema funcional de un SIG.

Los subsistemas principales en los que puede dividirse un SIG son:

1. **Entrada de datos:** en éste se colectan los datos a partir de varias fuentes como: fotografías aéreas, planos impresos, archivos digitales y datos de campo.
2. **Almacenamiento y administración de datos:** que organice la información espacial para su fácil agregación, recuperación y administración.
3. **Manipulación y análisis de datos:** que permita realizar procesos sobre los datos, tales como: agregado o simplificación de atributos espaciales o tabulares, estimación de nuevos parámetros, etc.
4. **Reporte:** en éste se despliega toda o parte de la base de datos ya sea de manera gráfica, tabular o en mapas.

La aplicación del SIG a la solución de problemas se realiza en varias etapas básicas:

- a) **Colección de datos.** Ésta es la parte fundamental del proceso de aplicación de los SIG y consiste en poblar las bases de datos que permitan realizar procesos de análisis y generar la cartografía correspondiente.
- b) **Procesamiento.** Los datos requeridos en el procesamiento involucran tratamientos necesarios para la obtención de los datos finales. Algunos de estos procesos son la agregación, clasificación, selección, etc.
- c) **Análisis.** Esta actividad inicia una vez que los datos son preparados para su interpretación y es donde reside realmente la potencialidad de los SIG. Es el proceso de buscar la existencia de patrones espaciales y las relaciones entre sus elementos.
- d) **Generación cartográfica.** Ésta se ha visto simplificada debido a las facilidades proporcionadas por el SIG. La generación de cartografía, tablas y gráficas mediante un SIG debería verse como el proceso de plasmar en papel los resultados de un análisis espacial, de mostrar las características de una *nueva información*.

3.5.2. Detección multiespectral de incendios

Una de las ventajas de las imágenes satelitales es que son multiespectrales, es decir, abarcan un ancho de banda mucho mayor de lo que es capaz de detectar el ojo humano. Cada imagen está compuesta por varias bandas, que no son más que diferentes tomas de la

reflexión de una misma zona de la superficie terrestre en diferentes intervalos de longitudes de onda. De cada escena, por tanto, se tienen varias imágenes que corresponden a las bandas azul-verde, verde, rojo, infrarrojo cercano, infrarrojo lejano, infrarrojo térmico, etc. La combinación o superposición de todas estas bandas entre sí ofrecen mayor información al investigador que una simple fotografía, ya que muchos fenómenos como las enfermedades de las plantas, los incendios forestales y otros, son detectados más fácilmente con la ayuda de las imágenes de bandas espectrales que no son accesibles al ojo humano. Los satélites actualmente en uso varían su resolución de las imágenes, desde unos 30 metros, hasta 1.1km.

El proceso es el siguiente, se utilizan los datos digitales multiespectrales del Radiómetro AVHRR de los pases del satélite NOAA-12 de la madrugada y al atardecer, conjuntamente con el pase del satélite NOAA-14 a la media noche (nadir solar). La observación y el seguimiento de la pluma de humo se realiza usando el pase del NOAA-14 (cenit solar). Los datos brutos en formato HRPT de imágenes (Transmisión de imágenes de alta resolución), LAC (cobertura local de área) se calibran radiométricamente y son georeferenciados (Kidwell, 1995). La cartografía utiliza la proyección cónica conforme de Lambert. Finalmente, con objeto de tener una mejor visualización de los puntos calientes para cada región se utilizan imágenes GAC (cobertura global de área). En cada región se efectúa la navegación en fino utilizando puntos de referencia (fundiciones, emisiones de gas, bahías, etc.).

La detección de los "focos calientes" (Matson *et al.*, 1987) se realiza con datos AVHRR de los canales 1 ($0.58 \leq \lambda \leq 0.68\mu\text{m}$), canal 3 ($3.53 \leq \lambda \leq 3.93\mu\text{m}$) y canal 4 ($10.30 \leq \lambda \leq 11.30\mu\text{m}$). El canal 1 (visible) define un albedo entre 3-6%, el cual es válido para todas regiones. Por otra parte, de acuerdo con la distribución de cuerpo negro, la irradiación recibida por el canal 3 (infrarrojo medio) se incrementa por un factor de aproximadamente 1500, comparado con el canal 4 (infrarrojo térmico) que tiene un factor de 5 (Matson, *et al.*, 1987). Esta respuesta diferencial es la base física para la detección con AVHRR de los incendios (Cracknell, 1997). En consecuencia, se utiliza el canal 3 para detectar emisiones anómalas de calor y el canal 4 para determinar la temperatura del entorno a cada punto

caliente; de tal manera que un píxel es clasificado como “fuego” o “incendio” si se cumplen las siguientes condiciones:

- $T3 > T4_{\min}$, donde $T3_{\min}$ es la temperatura del canal 3 del AVHRR, Esto asegura que los falsos píxeles calientes son contabilizados como biomasa ardiendo.
- $T3 \geq (T4 + 10)$, donde $T4$ es la temperatura del canal 4 del AVHRR. Esto asegura que los suelos desnudos calientes no sean confundidos como píxeles incendiados.
- Albedo $A1 < \text{Albedo}_{\max}$ (2 a 4%), esto es un proceso de enmascaramiento para evitar que los píxeles tengan un alto albedo debido a las características de nubes y superficie. Esta condición es aplicada a las imágenes NOAA-12 recibidas cerca del ocaso y del crepúsculo.
- $268 < T4 < 303$ K, esta condición discrimina falsos “puntos calientes” tales como: agua, vapor de agua sobre el suelo, rocas calientes, actividad volcánica, etc.

De manera general, la *detección multispectral de un incendio* estará regida por la condición $(T3 - T4) \geq 10$ K la cual define un incendio en nuestro algoritmo, aunque si bien, de acuerdo con Christopher (1998), el umbral $(T3 - T4) \geq 15$ K define un incendio intenso, El umbral que hemos impuesto en el método nos permite formar una base de datos que incluye las quemas agrícolas; este subconjunto de datos permitirá hacer estudios posteriores.

CAPITULO 4

LOS INCENDIOS FORESTALES EN NUEVO LEON TEMPORADA 1999-2000

Aspectos Generales.

El Estado de Nuevo León está integrado por 51 municipios y cuenta con una población de **3'883,182 habitantes**. Actualmente es un estado cuya amplia y creciente infraestructura productiva en los sectores primario e industrial le han ganado un lugar de gran importancia en México. Monterrey, su capital, se ha convertido en relativamente pocos años en una de las tres ciudades más importantes del país. Su área metropolitana —a la que se encuentran conurbados los municipios de Apodaca, Escobedo, Guadalupe, San Nicolás de los Garza, San Pedro Garza García y Santa Catarina, aglutinando al 82.1% de la población del estado es un centro de producción industrial de ladrillos refractarios, acumuladores, cerámica para construcción, cemento, refrescos, maquinarias y equipo, etc. Existen también, entre otras, industria automotriz, textil, de la construcción, alimentaria, cervecera, de minerales no metálicos, eléctrica y electrónica. Montemorelos y Linares han adquirido importancia en el ámbito estatal y nacional gracias al cultivo de cítricos, en particular de naranja. Montemorelos es llamado con gran acierto “la capital naranjera de México”, pues es ahí donde se encuentra el núcleo de la zona cítrica, que incluye los municipios de Linares, Hualahuises, Allende, Santiago, General Terán y Cadereyta. Además, en Linares y Montemorelos hay plantas industrializadoras que no sólo aprovechan las cosechas del lugar, sino que importan frutas de otros estados (piña de Loma Bonita, Oaxaca, e Isla y Tígues, Veracruz; limón de Colima, etc.) para su enlatado y distribución. Cadereyta

Jiménez cuenta con una de las refinerías de petróleo más grandes del país, donde se obtiene una amplia gama de productos derivados del petróleo, como lubricantes y petroquímicos.

4.1. Características Fisiográficas

El estado de Nuevo León se localiza en la parte nororiental del país, entre los 98° 17' y 101° 07' de longitud oeste, y los 23° 06' y 27° 50' de latitud norte. Limita al norte con el estado de Coahuila, los Estados Unidos de América y el estado de Tamaulipas. Hacia el poniente limita con Coahuila, San Luis Potosí y con Zacatecas. Al sur colinda con San Luis Potosí y Tamaulipas, con el que también comparte su límite oriental. Su superficie abarca 64,081.94 Km². El estado engloba porciones importantes de tres de las grandes regiones naturales -o provincias fisiográficas- del país: la Sierra Madre Oriental, la Gran Llanura de Norteamérica y la Llanura Costera del Golfo Norte.

La Sierra Madre Oriental domina todo el panorama occidental y meridional del estado. Sus sierras alargadas de calizas separan en sentido noroeste-sureste las tierras altas del suroeste neoleonés de las extensas llanuras del llamado plano inclinado. La parte de esta provincia que penetra en el estado de Nuevo León ocupa 9,602.69km² y en ella quedan englobados los municipios de Apodaca, Cadereyta Jiménez, Carmen, Ciénega de Flores, General Zuazua, Hualahuises, Marín, Pesquería, San Nicolás de los Garza y partes de Allende, General Escobedo, General Terán, Juárez, Linares, Montemorelos, Monterrey, Los Ramones y Salinas Victoria.

La Gran Llanura de Norteamérica comienza en el Este de Nuevo León y se extiende por toda la parte central de los Estados Unidos de América hasta Canadá. Esta región se caracteriza, en el estado, por los abundantes lomeríos suaves que dominan el paisaje de su porción nororiental a lo largo de una amplia franja paralela al río Bravo. El territorio que esta provincia ocupa en Nuevo León asciende a 31,340.86 Km² y abarca los municipios de Abasolo, Aramberri, Bustamante, Doctor Arroyo, Doctor González, Galeana, García, Garza García, General Zaragoza, Guadalupe, Higuera, Iturbide, Mina, Mier y Noriega, Rayones,

Sabinas Hidalgo, San Nicolás de Hidalgo, Santa Catarina, Santiago, Villaldama y partes de los de Agualeguas, Allende, Cerralvo, Juárez, Lampazos de Naranjo, Linares, Montemorelos, y Salinas Victoria.

La Llanura Costera del Golfo Norte abarca las tierras más bajas de Nuevo León. Por su morfología de llanuras aluviales extensas es la zona del estado que mejor responde al nombre de “plano inclinado”. Esta provincia abarca 23,138.39 Km² dentro del estado de Nuevo León. En ella se localizan los municipios de los Aldamas, Anáhuac, China, Doctor Coss, General Bravo, General Treviño, Los Herreras, Melchor Ocampo, Parás y Vallecillo, y partes de los de Agualeguas, Cerralvo, General Terán, Lampazos de Naranjo y Los Ramones.

En Nuevo León predominan los climas semiáridos y extremosos. Este hecho, unido a la relativa pobreza en recursos minerales metálicos, así como el alejamiento y difícil acceso desde el centro del país, hizo que los asentamientos coloniales fueran escasos. Como en otros estados norteños, a la lucha cotidiana con el medio se aunaban las que los indígenas de la zona sostuvieron durante siglos contra españoles y mestizos. La principal actividad en Nuevo León fue durante mucho tiempo la ganadería de pastoreo. No fue sino hasta fines del siglo XIX que se produjo en el estado el despegue industrial y agrícola que lo caracteriza. Los fértiles suelos de la llanura costera producen anualmente buena parte de los granos y cítricos del país. En otras regiones del estado son también abundantes los terrenos potencialmente aptos para la agricultura y en algunos de ellos se desarrollan ya dichas actividades. Sin embargo, en la entidad escasean los recursos hídricos –tanto superficiales como subterráneos- y ésto limita la agricultura continua, que sólo puede llevarse a cabo en la mayor parte del territorio neoleonés mediante el riego.

Las actividades pecuarias ocupan un lugar importante dentro de la economía del estado y son numerosos los terrenos potencialmente aptos para diversos usos de este tipo, bien sea mediante el cultivo de pastizales, o a través del aprovechamiento de la vegetación natural. El aprovechamiento de los recursos forestales de bosque y matorral, aunque limitado en muchos casos, puede también incrementarse. Las potencialidades naturales de

su tierra son amplias y pueden garantizar, si se aprovechan adecuadamente, una mayor prosperidad en el futuro.



Fig. 4.1 Fisiografía del Estado de Nuevo León
Fuente: INEGI 1999

4.1.1 Climatología

En Nuevo León predominan los climas semisecos extremos. La precipitación pluvial es en general bastante escasa, aunque cuenta con regiones que registran lluvias anuales mayores que 800mm. La media general anual del Estado oscila entre 300 y 600mm mientras que la temperatura media anual se sitúa en el intervalo de 14°C a 30°C. Los climas seco y semiseco se distribuyen principalmente en la región nororiental, la cual forma parte de la Gran Llanura de Norteamérica, y en la región suroccidental, separada de la primera por las alturas de la Sierra Madre Oriental. En áreas menores de la región de la sierra, en la zona centro y sur de la entidad y en gran parte de la cuenca del río San Juan, se registran los climas semicálidos, templados y semifríos.

Sierra Madre Oriental. Esta provincia presenta una distribución climática muy compleja, ya que se encuentran aquí diversos tipos de climas: secos extremos, semisecos, templados y semicálidos. Esto se debe principalmente a la marcada diferencia de altitudes en la sierra. Las diferencias de temperatura ocasionadas por la existencia de cadenas montañosas producen un efecto de condensación que, a su vez, genera lluvias que se concentran en la vertiente Este de la sierra, mientras que en la vertiente Oeste se desarrolla un fenómeno que se conoce como sombra orográfica, que da lugar a llanos o bolsones con clima seco o semiseco en las zonas de transición de la sierra al altiplano, así como a algunas porciones aisladas en las cumbres con climas templado y semicálido.

Gran Llanura de Norteamérica. Esta zona presenta principalmente climas secos, semisecos y semicálidos subhúmedos en pequeñas áreas. Estos tipos de clima se caracterizan por la baja humedad y la escasa precipitación, ocasionadas, entre otros factores, por la influencia de vientos secos en la zona. Se exceptúa de esta situación la porción sur, en donde debido a la influencia de las masas de aire húmedo el clima es semicálido subhúmedo.

Llanura costera del Golfo Norte. Los climas dominantes de la llanura son los semicálidos subhúmedos, aunque en un área reducida del noroeste se presenta el clima seco. Es en la parte del estado que queda comprendida dentro de la región de la llanura costera, donde se nota la influencia de vientos húmedos provenientes del Golfo. Ahí se registran las máximas precipitaciones, mayores de 800mm, sobre todo en la zona de transición entre la llanura y la sierra debido a los fenómenos de condensación por cambios de altitud.

De acuerdo con las tres zonas definidas y en relación con sus climas, los fenómenos de heladas tienen una distribución particular en cada caso. Las heladas en los climas semicálidos de la Llanura Costera del Golfo Norte presentan una frecuencia de 0 a 20 días al año. Esto se debe básicamente al régimen térmico elevado, el cual sólo permite la presencia de estos fenómenos en los meses de diciembre y enero distribuidos de manera irregular. En la zona de climas secos de la Gran Llanura de Norteamérica y de la Sierra Madre Oriental las heladas tienen también una frecuencia de 0 a 20 días por año, con excepción de las áreas con clima semiseco templado. En las sierras y llanuras occidentales

se registran en periodos de 20 a 40 días por año. En las partes altas de la Sierra Madre Oriental, donde los climas son templados, se presentan heladas con una frecuencia que va de 20 a 60 días por año, sobre todo en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero.

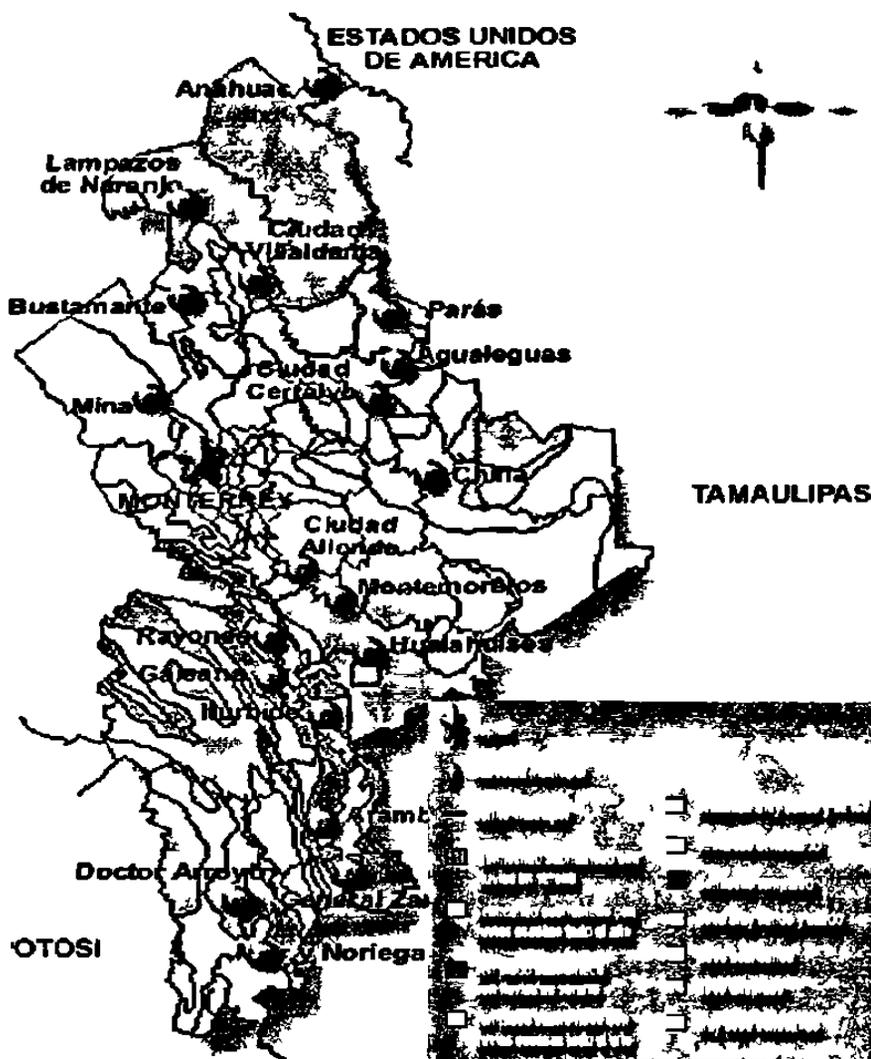


Figura 4.2 Climas del Estado de Nuevo León.

Fuente: Modificado de INEGI 1999

4.1.2 Geología.

En el estado de Nuevo León afloran principalmente rocas sedimentarias de origen marino (depósitos clásticos y químicos de edad mesozoica). Sólo hay pequeños afloramientos de rocas metamórficas y algunos de rocas ígneas intrusivas. Las rocas más antiguas de Nuevo León son esquistos de edad precámbrica que afloran en el área de Aramberri. La mayor parte de las rocas que forman grandes estructuras plegadas (anticlinales y sinclinales), que caracterizan a la Sierra Madre Oriental, son del Mesozoico. Los depósitos más recientes están constituidos por conglomerados y suelos aluviales que pertenecen al Cuaternario. La

geología económica del estado descansa principalmente en la explotación de minerales no metálicos y de bancos de roca caliza.

Sierra Madre Oriental. Ocupa la mayor parte de la porción occidental del estado y limita al oriente con la Llanura Costera del Golfo Norte y con la Gran Llanura de Norteamérica. Las rocas más antiguas de esta provincia en Nuevo León son esquistos. Hay afloramientos de areniscas y asociaciones de lutitas y areniscas intercaladas. También existen afloramientos masivos de caliza, yeso, yeso asociado con caliza y asociaciones de calizas-lutitas. Los depósitos más recientes están formados por conglomerados de rocas ígneas intrusivas con rocas sedimentarias y por rellenos aluviales.

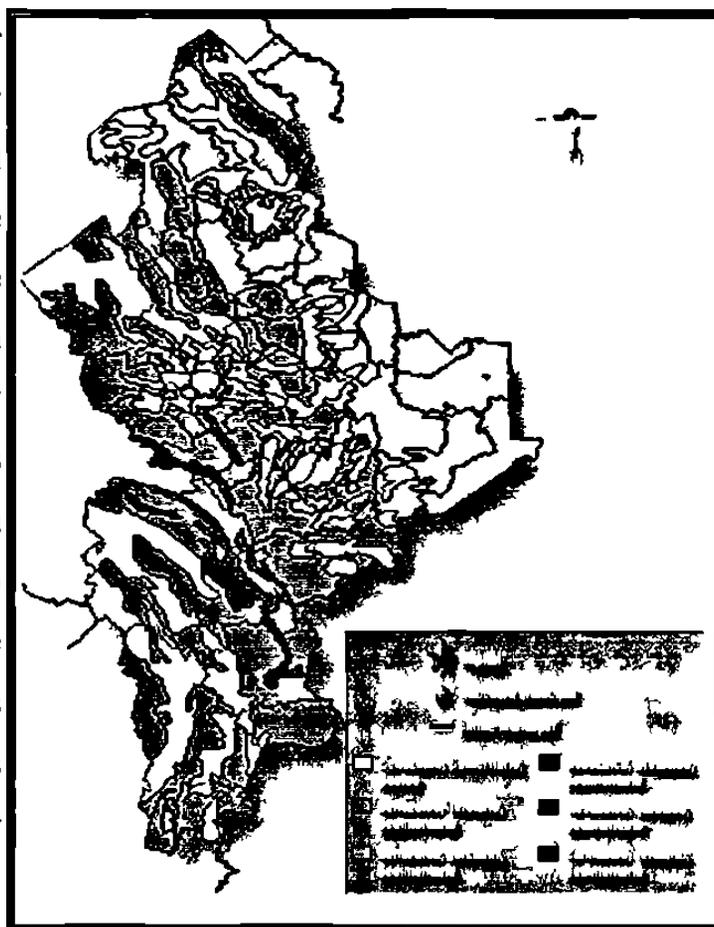


Figura 4.3 Geología del Estado de Nuevo León

Fuente: Modificado de INEGI 1999

En esta provincia se encuentran los principales yacimientos minerales del estado, algunos de los cuales están siendo explotados a muy pequeña escala. Por lo demás, la mayoría de los antiguos yacimientos de minerales metálicos se encuentra abandonada debido a diversos problemas técnicos y socioeconómicos. Respecto a los minerales no metálicos en esta provincia se realizan las explotaciones más importantes de Nuevo León. En el área de Monterrey se explotan numerosos bancos de caliza, que se utiliza en la industria de la construcción, en la siderurgia y en la industria del vidrio. Otros minerales no metálicos explotados en esta provincia son la fosforita, la barita y el yeso. La fosforita se explota principalmente en el municipio de Galeana, por grupos pequeños de mineros que trabajan de forma independiente y aplican técnicas rudimentarias, lo que da por resultado una producción baja y esporádica, ya que la demanda de este mineral es variable. La

