

- * Preparación de datos iniciales y lectura de imagen
- * Corrección orbital con parámetros de TBUS
- * Sistema de localización automática de puntos de control
- * Corrección orbital por puntos de control
- * Corrección geométrica polinómica
- * Corrección atmosférica de las bandas visibles de NOAA
- * Corrección atmosférica de las bandas térmicas de NOAA
- * Cálculo del Índice de Vegetación Normalizado.
- * Cálculo de Temperaturas de Superficie.
- * Cálculo de Emisividad.

- Procesos en desarrollo:

- * Detección de nubes
- * Cálculo de ángulos del Sol y del Satélite NOAA.
- * Cálculo de Evapotranspiración.
- * Estudio del comportamiento temporal de parámetros físicos frente a años modelo.
- * Automatización global de la cadena de tratamientos

V.3.1.4. OBTENCION DE RESULTADOS A PARTIR DEL TRATAMIENTO DE IMAGENES NOAA

V.3.1.4.1. Evolución del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) durante los dos años de estudio: octubre'90-septiembre'91 y octubre'93-septiembre'94.

Las imágenes NDVI se han utilizado para analizar el comportamiento de la vegetación en Andalucía durante los dos años hidrológicos de estudio: un año de referencia, de octubre 1990 a septiembre 1991 y un año muy seco, de octubre 1993 a septiembre 1994.

Este índice ha sido muy utilizado en diversos estudios de vegetación por la capacidad para describir diversos parámetros de la misma como la superficie de área foliar, la radiación fotosintética activa, parámetros de cálculo de la evapotranspiración etc. Esta estrecha relación con el estado fenológico de la vegetación permite utilizar el índice como medida del contenido de humedad de la misma, aspecto directamente relacionado con el peligro de incendios forestales.

Las fechas seleccionadas para establecer el análisis comparativo fueron las siguientes:

<u>1990-1991</u>	<u>1993-1994</u>
6 octubre	4 octubre
1 diciembre	8 diciembre
13 enero	26 enero

6 abril	2 abril
8 junio	3 junio
15 julio	12 julio
13 agosto	16 agosto
9 septiembre	9 septiembre

A fin de obtener condiciones similares de iluminación y obtener la máxima información espacial, se procuró que las imágenes seleccionadas fueran tomadas en días similares de cada año y que la cobertura nubosa fuera mínima, lo cual no siempre fue posible. Dado que el proceso de detección automática de nubes aún no estaba operativo cuando las imágenes fueron procesadas, para enmascarar las nubes se utilizaron otras bandas del satélite, normalmente la banda 2, la banda 4 o ambas inclusive, que facilitarían la discriminación de mar, tierra y nubes. Con este proceso se consiguió enmascarar la mayoría de las nubes de las imágenes, aunque no su totalidad. Para eliminar definitivamente todas las nubes es necesario un método más preciso, que permita detectar todo tipo de nubes, como las nubes bajas o las que son inferiores al tamaño del píxel, las cuales introducen errores interpretación de la información de la imagen por confundirse con los píxeles de tierra.

El proceso de clasificación de las imágenes consistió en una agrupación de los rangos del Índice de Vegetación en una serie de clases que fueron siempre las mismas para todas las imágenes y años. Es importante el hecho de que los umbrales de segmentación fueron establecidos a partir de los histogramas correspondientes a las imágenes 90-91, definiéndose ocho clases correspondientes a niveles de estrés. Por esta razón, la comparación de cada par de imágenes del mismo mes en los dos años ha de hacerse siempre en términos relativos, entendiendo que las clases fueron establecidas en el año de referencia y son siempre relativas a dicho año. Esto es importante por las razones siguientes:

- el cálculo del índice de vegetación se ha realizado con las cuentas digitales directamente, no habiéndose realizado ningún proceso de calibración que, además tuviera en cuenta la degradación del sensor entre ambas fechas.
- las imágenes del mismo mes no corresponden a la misma hora exacta, ya que el paso del satélite NOAA-11 iba produciéndose paulatinamente cada vez más tarde.
- no se efectuó corrección atmosférica en las imágenes.

Si bien es cierto que el propio Índice de Vegetación consigue atenuar en parte las influencias atmosférica y de ángulos de visión del sensor y del satélite, es necesaria para el futuro una corrección atmosférica que elimine de una forma más precisa la influencia que los distintos componentes atmosféricos ejercen sobre la respuesta espectral de los objetos de estudio. En relación a esto

último, algunas imágenes NDVI se han considerado como anómalas (la imagen del 8 de diciembre del 93, por ejemplo), entendiéndose como anómalo un comportamiento de estrés excesivo, producido por una fuerte influencia atmosférica.

Una alternativa de corrección atmosférica son las composiciones sintéticas de imágenes NDVI de varios días, utilizando el valor NDVI más alto de la serie para cada píxel, ya que se considera que es el menos afectado por la influencia atmosférica y de ángulo de visión del sensor. Esta técnica resulta muy adecuada para estudios de series temporales de muchas imágenes, siendo para ello necesaria una automatización previa de las distintas correcciones geométricas de las imágenes, lo que está siendo puesto en marcha actualmente.

Por las razones expuestas más arriba, no es conveniente hablar de las clases NDVI de forma absoluta para el período 93-94, sino de forma relativa por comparación a los rangos de segmentación en clases establecidos en el período 90-91.

El proceso de análisis realizado consta de dos fases:

- análisis de la evolución del Índice de Vegetación para los años 1990-1991 y 1993-1994.
- comparación de los valores del Índice de Vegetación en ambas fechas para zonas de muestreo.

Como se ha dicho anteriormente, el Índice de Vegetación Normalizado se utiliza para describir y cuantificar parámetros relacionados con el estado de la vegetación. Al no haberse realizado medidas en el campo que relacionen las medidas del satélite con alguno de estos parámetros, el análisis se hará de forma cualitativa mediante la relación del índice con aspectos como el estrés de la vegetación, definido éste como grado de falta de humedad de la misma, tanto en vegetación natural como cultivada, y con la altura y cobertura en el caso de la vegetación cultivada. En este sentido, las clases de la leyenda que llevan tonos marrones están referidas a las zonas donde hay más falta de agua, confundiendo la clase de estrés máximo con zonas donde hay una total o casi total ausencia de vegetación, como las zonas de barbecho o de desierto, zonas de cultivos bajo plástico, zonas urbanas, arenales, etc. Por el contrario, las clases en tonos verdes indican mayor contenido de humedad y de vigor clorofílico estando, por tanto, en relación inversa con el estrés de la vegetación.

a) Análisis de las imágenes del año de referencia (1990-1991):

El año hidrológico 1990-1991 se caracterizó por la persistencia de situaciones de estabilidad atmosférica, con escasez de precipitaciones y temperaturas medias elevadas, dentro de una fase de sequía típica del clima mediterráneo, que se ha prolongado posteriormente. La persistencia de la

situación de sequía durante 1993-1994 y el consiguiente descenso en los niveles de contenido de humedad de la vegetación queda patente al comparar los mismos meses en los dos años seleccionados, tanto en espacios de vegetación natural como en las zonas de cultivos de secano.

En la imagen del 6 de octubre de 1990 aún es patente la fuerte sequía estival y el agotamiento de la reserva hídrica del suelo, como muestran los altos niveles de estrés presentes en la imagen. Únicamente las zonas de sierra como Los Alcornocales, Grazalema, Sierra Bermeja, Cazorla y Sierra Morena reflejan alguna actividad clorofílica. Las zonas de cultivos de secano de todo el valle del Guadalquivir y depresiones interiores dan los más altos niveles de estrés, ya que en esa época los suelos están todavía desnudos o en barbecho.

El cambio en el ciclo de los cultivos de secano se refleja en algunas zonas a comienzos de diciembre de 1990, como la Campiña de Jerez, la zona del Aljarafe sevillano y El Condado onubense, que muestran una actividad clorofílica moderada-alta, resultado de una siembra temprana o de lluvias en la zona. También es patente la extensión de los niveles de actividad clorofílica moderada-alta en todas las zonas serranas, resultado de las precipitaciones de otoño. El resto de las zonas de campiña sigue desprovisto de vegetación en esta fecha, correspondiéndose con los altos niveles de estrés, como también es el caso de otras áreas sin vegetación como las zonas urbanas y sus áreas de influencia, zonas de cultivos bajo plástico (Campo de Dalías), zonas sin vegetación (Desierto de Tabernas, zonas de suelos desnudos acaravados de las altiplanicies de Baza-Guadix), zonas de marismas o zonas de regadío del Bajo Guadalquivir. Salvo el caso del regadío, estas zonas suelen tener un comportamiento espectral estable, sin grandes cambios en sus valores correspondientes al Índice de Vegetación.

En la imagen del 13 de enero de 1991, el ciclo de los cultivos de secano sigue avanzando, incluyéndose ya algunas zonas del valle del Guadalquivir en los niveles moderados de vigor clorofílico, lo que indica una cierta cobertura del suelo por los cultivos, que empiezan a ganar en altura. Únicamente las zonas de barbecho son las que ofrecen los niveles más altos de estrés, al igual que las zonas caracterizadas por su comportamiento estable en el índice. Asimismo, aumenta además la reserva hídrica para las zonas de vegetación natural por las lluvias de otoño, lo que las sitúa en su mayoría en los niveles de actividad clorofílica alta-muy alta.

Los niveles más altos de actividad clorofílica y contenido de humedad y su máxima extensión se alcanzan en Andalucía en la imagen del 6 de abril de 1991, en la cual

los valores más altos se producen mayoritariamente en las zonas cerealeras, ya que es en esta fecha cuando la altura y densidad de los cultivos herbáceos de secano, como ocurre en la Campiña de Jerez, alcanzan su cota máxima. Las zonas de vegetación natural se sitúan en niveles altos-muy altos de actividad clorofílica y sólo en algunas zonas (Hornachuelos) se alcanzan los valores máximos. Este comportamiento es sin embargo más estable en el tiempo que el de la vegetación cultivada, cuyos niveles de humedad y de actividad clorofílica descienden de forma más extrema al principio del verano, justo antes de la siega.

El descenso en los niveles de actividad clorofílica de la vegetación en los cultivos se refleja en la imagen del 8 de Junio de 1991. En esta zona se aprecia el descenso en niveles de vigor clorofílico y humedad de las zonas de campiña, aunque globalmente se siguen manteniendo en niveles altos. El descenso es menos pronunciado en las zonas de vegetación natural, que en la zona del Parque Natural de Los Alcornocales alcanza valores altos y muy altos de vigor clorofílico y humedad por la presencia de lluvias de primavera. También en la imagen de esta fecha puede apreciarse el ciclo de los cultivos de regadío de la vega de Sevilla, que aparecen con altos niveles de vigor clorofílico.

La situación en la región cambia radicalmente con la sequía estival y las altas temperaturas del verano, descendiendo progresivamente a lo largo de todo el verano la reserva hídrica del suelo y por tanto el contenido de humedad de la vegetación natural. Este fenómeno se hace patente en la imagen del 15 de julio de 1991. En esta fecha, las zonas cerealeras están bien desprovistas de vegetación, bien con cobertura de rastrojos, como evidencian sus altos niveles de estrés. Las zonas de montaña siguen reflejando, no obstante la sequía estival, altos niveles de actividad clorofílica de forma general: moderados en Sierra Morena, moderados-altos en Cazorla, Sierra Nevada y Sierra de Huelva y Altos en Grazalema, Alcornocales y Sierra Bermeja, debido a una mayor influencia marina. En cuanto a zonas de cultivo, hay que señalar los regadíos de las vegas de Granada, Sevilla y del Genil respectivamente, alcanzando los máximos niveles los cultivos de arroz del Bajo Guadalquivir.

Durante todo el verano la evolución del índice se traduce en un descenso de la actividad clorofílica de la vegetación natural en toda la región, manteniéndose tímidamente en las zonas de montaña señaladas más arriba. Este descenso de niveles de actividad clorofílica y contenido de humedad durante el verano aumenta el peligro de incendios forestales en la región. En 1991 se produjeron una serie de grandes incendios forestales superiores a las 1.000 Ha., que quedan registrados en las imágenes NDVI del verano dentro de los niveles de máximo estrés. De izquierda a

derecha, aparecen los incendios de Almonaster, Aracena-Campofrío y Escacena-Paterna-Berrocal, en la provincia de Huelva, el incendio de Tarifa, en Cádiz y finalmente, el gran incendio de Sierra de las Nieves, en Málaga.

En relación al comportamiento de la vegetación del año 1990-1991, el año 93-94 evidencia un mayor estrés en la vegetación, resultado de la sequía prolongada que viene sufriendo la región, como lo ponen de manifiesto las imágenes NDVI. En la imagen del 4 de octubre de 1993, es patente un aumento de niveles de estrés en toda la región, en comparación al mismo mes de 1990. El contraste es más evidente en las zonas de vegetación natural, donde el descenso en los niveles de actividad clorofílica en las zonas de montaña, que registran valores mínimos-moderados, contrasta con los niveles más altos de octubre de 1990. Ejemplo de ello es la zona de Los Alcornocales, donde los niveles de actividad clorofílica son manifiestamente más bajos que en el mismo mes en 1990.

El descenso de niveles de actividad clorofílica y niveles de humedad en la vegetación a causa de la sequía en el año 1993-1994 se refleja en todas las imágenes NDVI de dicho año. Para caracterizar de una manera más explícita este fenómeno, se han seleccionado una serie de zonas en la región, analizándose los valores NDVI de las mismas para las dos fechas, representados en una gráfica, como se explicará más adelante.

De una manera general, existe un descenso generalizado de niveles de actividad clorofílica para 1993-94 en toda la región en relación al período de referencia. En el caso de los cereales, el descenso en los niveles de actividad clorofílica se explica por una menor densidad de ocupación y una menor altura de los herbáceos de secano. La menor disponibilidad de agua en esta fecha acortó el ciclo de estos cultivos y por tanto, adelantó la época de la cosecha, como muestran los niveles de estrés en la imagen del 3 de junio de 1994 en comparación al 8 de junio de 1991. En el caso del regadío también los niveles de actividad clorofílica son en general más bajos. Durante ese año no se sembró arroz en el Bajo Guadalquivir por falta de agua, como lo pone de manifiesto la imagen del 16 de agosto de 1994, con niveles muy altos de estrés, en comparación a la de 1991, que presenta los niveles más altos de actividad clorofílica de la vegetación.

En cuanto a la vegetación natural, el contraste más fuerte aparece entre las imágenes del 6 de abril de 1991 y el 2 de abril de 1994. En 1994, hay un descenso generalizado de niveles de actividad clorofílica con respecto a 1990, debido a las pocas lluvias de primavera en la región.

Finalmente, en las imágenes de agosto y septiembre de

1994 la vegetación natural muestra unos niveles muy bajos de actividad clorofílica, que son aún más bajos que en un año normal al final de la sequía estival, debido a las extremas condiciones de falta de agua en la región. Unido a la falta de humedad en la vegetación natural, el peligro de incendios forestales fue extremo durante el verano, y como consecuencia, en el verano de 1994 se han producido una serie de grandes incendios forestales superiores a 1.000 Ha, que aparecen recogidos en las imágenes de verano en el nivel más alto de estrés.

b) Análisis comparativo en zonas muestrales de los niveles de actividad clorofílica de 1990-91 y 1993-94:

Para analizar la influencia que la sequía está ejerciendo sobre el ciclo de los cultivos de secano, el cambio de usos del suelo en algunos casos, y el descenso del contenido de humedad y actividad clorofílica en la vegetación natural en Andalucía, se seleccionaron una serie de zonas muestrales en toda la región. Para cada zona de muestreo, se representaron sus valores NDVI para 13 fechas dentro de los dos años de estudio, 1990-91 y 1993-94.

Cada zona seleccionada muestra el uso del suelo, obtenido a partir del Mapa del Uso del Suelo de 1987 a escala 1:100.000, existente en formato vectorial en el Sistema de Información Ambiental de Andalucía, Sinamba. El uso del suelo correspondiente a cada código aparece en la leyenda explicativa adjunta al final de la serie. El año de producción del mapa, 1987, y su escala, 1:100.000 permiten dar una idea global del uso del suelo en cada zona, uso del suelo que ha cambiado en algunas zonas desde esa fecha, como lo evidencia el cambio brusco de niveles NDVI en los gráficos para algunas zonas.

Las veinticinco zonas seleccionadas describen de una manera general todo tipo de usos del suelo en Andalucía, desde vegetación natural y semi-natural, a cultivos herbáceos de secano, regadío, zonas arroceras, marismas o zonas del desierto almeriense.

Estas zonas se han denominado de la forma siguiente:

- 1.- Parque Natural Sierra de Aracena y Picos de Aroche
- 2.- Paraje Natural Sierra Pelada y Ribera del Aserrador
- 3.- Parque Natural Sierra Norte
- 4.- Parque Natural Sierra de Hornachuelos
- 5.- Parque Natural Sierra de Andújar
- 6.- Parque Natural Sierra Mágina
- 7.- Parque Natural Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas
- 8.- Parque Natural Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas
- 9.- Parque Natural Sierra de Baza
- 10.- Parque Natural Sierra Nevada
- 11.- Parque Natural Sierra Nevada

- 12.- Parque Natural Sierra de Las Nieves
- 13.- Parque Natural Sierra de Grazalema
- 14.- Parque Natural Los Alcornocales
- 15.- Parque Natural Los Alcornocales
- 16.- Parque Nacional de Doñana
- 17.- Parque Nacional de Doñana
- 18.- Campiña de Córdoba
- 19.- Campiña de Sevilla
- 20.- Campiña de Jerez
- 21.- Campiña de Guadix-Baza
- 22.- Regadíos del Bajo Guadalquivir: Lebrija
- 23.- Zonas arroceras: La Puebla del Río
- 24.- Regadíos: Vega de Sevilla
- 25.- Paraje Natural Desierto de Tabernas

La evolución general del índice para los dos años se traduce en unos niveles bajos al principio del otoño, una recuperación lenta a lo largo del otoño e invierno, un máximo primaveral y un descenso paulatino a lo largo del verano, estando siempre la curva del año de referencia siempre por encima de la del año seco.

Para facilitar el análisis, éste se centrará en una serie de zonas representativas de los usos de suelo referenciados, cuyas curvas NDVI obedezcan a una evolución normal, sin cambios bruscos en los niveles del índice por influencia atmosférica y meteorológica local.

Las zonas seleccionadas son las siguientes: zona 1 (Aracena), zona 19 (Campiña de Sevilla), zona 22 (Lebrija), zona 23 (La Puebla del Río) y zona 25 (Tabernas). A partir de los valores calculados para todas las fechas, se calcularon las diferencias para los dos años en los valores NDVI:

	Aracena	Sevilla	Lebrija	La P.del R.	Tabernas
Octubre	12	00	08	04	00
Diciembre	15	04	00	-07	03
Enero	22	05	06	01	05
Abril-1	12	10	-03	-20	00
Abril-2	14	04	06	-09	03
Junio-1	05	16	06	-05	04
Junio-2	02	10	00	-02	00
Junio-3	04	05	04	26	00
Julio-1	02	02	12	47	04
Julio-2	09	07	19	43	02
Agosto-1	03	04	23	45	00
Agosto-2	02	00	18	43	03
Septiembre	08	02	21	49	02

Las diferencias en los valores NDVI entre los dos años sirven para dar idea de la magnitud de la sequía en Andalucía

durante el año 1994, como lo demuestran las diferencias existentes en todos los meses en los dos años. Los gráficos que representan la evolución del Índice de Vegetación en ambas fechas, muestran las dos curvas con un comportamiento similar, con máximos de primavera y mínimos de verano, contrastando ampliamente en el caso de los regadíos de Lebrija y la zona arrocera de Puebla del Río. Sin embargo, salvo estos casos, la curva de 1993-94 está siempre por encima de la curva 1990-91, debido a la influencia de la sequía en cuanto a la disponibilidad de agua, incluso en zonas de comportamiento espectral estable como el Desierto de Tabernas. Los valores de Lebrija y Puebla del Río muestran unas diferencias muy altas a partir de finales de Junio, evidenciando un probable cambio de uso del suelo, del regadío al secano en el caso de Lebrija, y de cultivos de arroz a suelo desnudo, en el caso de Puebla del Río, donde de hecho no se sembró arroz en 1994. La zona cerEalística de Sevilla también evidencia la menor disponibilidad de agua en todo el año, resultando un menor desarrollo del cultivo, lo que se refleja en las diferencias desde el mes de Abril a mediados de Junio. En este mes es donde se dan las mayores diferencias, resultado del adelantamiento de la época de siega en 1994, por lo que las imágenes de la zona en esta fecha describen un suelo desnudo. Por último, en la Sierra de Aracena las diferencias se mantienen altas durante todos los meses en los dos años hasta el mes de Junio, resultado de la sequía. Las diferencias a partir del verano son menores, ya que la influencia de la sequía de verano se refleja en ambas fechas, aunque en el gráfico, la curva de 1990-91 está siempre a un menor nivel que la curva de 1993-94.

c) Conclusiones

La repetida cobertura temporal del territorio por el NOAA-AVHRR y la posibilidad de disponer de estas imágenes de forma relativamente rápida hacen a este satélite muy útil para el seguimiento de diversos parámetros de la vegetación sobre los que se necesite una información en tiempo real o casi real. En este sentido, la estrecha relación con el contenido de humedad de la vegetación natural hace que resulte muy adecuado para determinar, junto a otros parámetros meteorológicos, el peligro de incendios forestales. En relación a la vegetación cultivada, el Índice permite estudiar la incidencia de la sequía sobre el ciclo de los cultivos de secano, tanto de forma cualitativa como cuantitativa a partir de la diferencia en productividad del cultivo entre ambos años, calculada mediante las imágenes NDVI y su relación con muestreos realizados en el campo.

Por todo ello, de una manera global, y a escala regional, el Índice de Vegetación Normalizado calculado a partir de las imágenes NOAA-AVHRR constituye una buena herramienta para caracterizar los cambios producidos en la vegetación natural y cultivada con una escala temporal diaria o casi diaria.