



Análisis espacial del comportamiento fenológico de la vegetación en la cuenca del río Chira usando imágenes de alta resolución espectral.

Spatial Analysis of phenological behavior of vegetation in the Chira River using high spectral resolution images

NINELL JANETT DEDIOS MIMBELA¹

¹Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). DR01: Avda. Independencia Mza. O' lote 5 Primera Etapa. Urbanización Miraflores (Castilla-Piura).

ndedios@senamhi.gob.pe

Resumen

El presente artículo forma parte del proyecto "MONITOREO DE LOS ECOSISTEMAS AGRICOLAS Y NATURALES EN LA REGION PIURA DESDE LAS TECNOLOGIAS: TELEDETECCION Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA". El objetivo de este trabajo es dar a conocer con la metodología utilizada desde (imágenes de satélite multitemporales LANDSAT y ASTER) y demostrar la importancia del análisis del índice de vegetación (NDVI). En este sentido, se ha logrado establecer patrones fenológicos de producción y crecimiento para los principales ecosistemas agrícolas y naturales en la cuenca del río Chira: bosque seco de montaña, Bosque llanura, matorral, agricultura y suelo desnudo y/o desprotegido. Para ello se han analizado y procesado imágenes de satélite con el fin de seleccionar áreas de muestreo de valores de NDVI.

Una vez seleccionados y colectados los valores de NDVI para las imágenes en distintas fechas, se ha procedido a analizar el ecosistema (natural o artificial) seleccionado, utilizando un método de análisis temporal.

Los principales resultados obtenidos son: La variación fenológica de los ecosistemas (naturales y artificiales) que se corresponden con la estacionalidad climática de las áreas estudiadas. En este sentido, la mayoría de los cambios y variaciones específicas para cada ecosistema son explicados en base a las características funcionales y estructurales de cada ecosistema. Los resultados obtenidos pueden servir como insumo para mejorar el proceso y clasificación de las imágenes de satélite con el objeto de elaborar mapas temáticos y contribuir a la mejor toma de decisiones en cuanto al uso adecuado de los calendarios agrícolas definidos para cultivos anuales y/o transitorios instalados en la cuenca.

Palabras claves: Imágenes de satélite, bosque seco, índices de vegetación NDVI, series de tiempo.

Abstract

Presented study forms a part of the project "MONITORING OF THE AGRICULTURAL AND NATURAL ECOSYSTEMS IN THE PIURA REGION USING TECHNOLOGIES: REMOTE SENSING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS". The objective of this paper is to present the methodology used in the study (multi-temporal satellite images LANDSAT and ASTER) and to demonstrate the relevance of the analysis of vegetation index (NDVI). Phenological patterns of production and growth were established for the main agricultural and natural ecosystems in the Chira River basin: dry mountain forest, forest plains, scrubland, agricultural land and bare and/or unprotected soils. For this purpose satellite images were analyzed and processed in order to select sampling areas for NDVI values.

Once the NDVI values were selected and collected for images of different dates, the selected ecosystem (natural or artificial) was analyzed, using a temporal analysis method.

Main results obtained are: Phenological variations in ecosystems (natural and artificial) correspond to the climate seasonality in the studied areas. Most of the changes and specific variations in each ecosystem are explained on the basis of functional and structural characteristics of each one of them. The obtained results can serve as input for improvement of the processing and classification of satellite imagery in order to elaborate thematic maps and contribute to a better decision-making with respect to the appropriate use of agricultural calendars for annual and/or transitory crops in the basin.

Key words: Satellite images, dry forest, vegetation indices NDVI, time series.

INTRODUCCIÓN

La cuenca Catamayo-Chira es una de las más importantes cuencas binacionales del norte del Perú constituido por dos importantes ríos. En territorio peruano: el río Chira y en territorio ecuatoriano: el río Catamayo, ocupa una superficie de 19 095 km² de los que 7 162 km² se encuentran en Ecuador y 11 933 km² en Perú (ubicada entre las coordenadas 03°40'28" y 05°07'06" de Latitud Sur y 80°46'11" y 79°07'52" de Longitud Oeste).

Dentro de la cuenca y desde un enfoque de desarrollo agrícola, destaca la ubicación de 2 importantes reservorios (Poechos y San Lorenzo) que sirven como regulador de las aguas procedentes de la cuenca alta, siendo los años de 1982, 1983, 1997 y 1998 los que representaron para la cuenca un serio problema al ser afectada por el Fenómeno El Niño, caracterizado por lluvias intensas y consecuentes inundaciones con gran arrastre de sedimentos generados por la erosión hídrica. Siendo, el principal usuario del sistema de la cuenca Chira, el sector agrícola utiliza el recurso hídrico para la producción de cultivos muchos de ellos con fines de exportación. De manera progresiva, la demanda de este recurso se hace cada vez mayor por la ampliación de las áreas agrícolas, en desmedro de los bosques secos por el desarrollo de actividades económicas como es el caso del uso de más de 20,000 ha, para la producción de etanol en base a cultivos de caña que genera nuevos conflictos por el destino del recurso hídrico (Ortiz, 2007).

Asimismo, el incremento en la demanda de producción de alimentos y la actividad forestal de carácter extractivo-selectivo (INRENA, 1995) produce su alteración, por la pérdida de especies de complicada regeneración natural (los bosques).

De lo expuesto, la teledetección al considerar los procesos productivos y ambientales, es una herramienta importante, al ofrecer una visión temporal y espacial de la cobertura y desarrollo de la vegetación (Hobbs 1989; Running 1989). Asimismo por su aplicación, permite su evaluación y seguimiento del estado de las cubiertas vegetales y su correlación con variables climáticas, por lo cual el ritmo de producción de biomasa verde para cada ecosistema dependerá de las

condiciones ambientales principalmente del régimen climático (Monasterio y Sarmiento 1976; Sarmiento 1990). Bajo esta perspectiva, la teledetección, ha creado una gran expectativa en la caracterización biofísica de la vegetación, de ello los trabajos en esta área muestran relaciones empíricas entre la información captada por los sensores (radiancia), y diversas variables biofísicas [biomasa, índice de área foliar (IAF), cobertura, etc.]. De otro lado, los Sistemas de Información Geográfica SIG, representan una contribución al desarrollo de la agricultura a beneficio de quienes la trabajan y toman decisiones.

El objetivo del presente trabajo es determinar desde la interacción de imágenes de satélite ASTER y LANDSAT los estados fenológicos de los principales ecosistemas de un sector de estudio de la cuenca del río Chira.

MÉTODOS

Tres imágenes de satélite fueron adquiridas para el desarrollo del estudio (1 imagen LANDSAT TM año 2000 con 30 metros de resolución en el infrarrojo y visible), imágenes Aster del sensor TERRA (Febrero del 2006 y 2007 con 15 metros de resolución en el visible e infrarrojo cercano y 30 metros en el infrarrojo medio), todas ellas imágenes de verano.

Definición de las estrategias de seguimiento

Para determinar la evolución normal de los ecosistemas que configuran el paisaje de la cuenca sería útil construir modelos que establezcan su relación con variables climáticas. De ello se considera la línea de trabajo abordada por autores que destacan la gran dependencia entre el NDVI y la climatología de la zona (Hielkema et al., 1986, Malo & Nicholson, 1990, Davenport & Nicholson, 1993), quienes encontraron correlaciones apreciables entre las precipitaciones y los NDVI en zonas cálidas. Asimismo, niveles de clasificación entre las cubiertas vegetales fueron considerados para comprender los períodos del desarrollo fenológico de los cultivos instalados en las fechas adquiridas por el sensor y su estado

mediante el uso del NDVI siendo necesario su análisis de la tendencia en el tiempo (Chuvienco, 1998).

Índices de Vegetación y Datos

Como magnitud física primaria, se ha utilizado tradicionalmente el análisis de reflectividad espectral que permite identificar rasgos de absorción atribuidos a la superficie bajo estudio. En el caso de la vegetación, estos rasgos son debidos principalmente a la presencia de clorofila, las cuales presentan una baja reflectividad, en el espectro electromagnético en la región espectral del rojo (0,62-0,70 μm) y una reflectividad alta en la región del infrarrojo cercano (0,7-1,1 μm). Es precisamente este contraste entre ambas regiones espectrales fundamental para ser considerado como método para identificar cubiertas de interés y su estado sobre la zona de investigación que obedece a impactos naturales tanto de déficit hídrico como por fenómeno del niño.

De esta manera, los datos de NDVI fueron obtenidos desde las imágenes LANDSAT (año 2000) y ASTER (años 2006 y 2007), todas ellas imágenes de verano en los canales 1, 2 del visible y 4 del infrarrojo. Luego de haber sido procesadas, corregidas geométrica y radiométricamente, resumidas en imágenes de composición (Chuvienco, 1998), se procedió al cálculo de los índices de vegetación normalizado y diferenciado (NDVI), definido según (Tarpley *et al.*, 1984):

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_r}{\rho_{nir} + \rho_r} \quad (1)$$

donde ρ_{nir} y ρ_r son los valores de reflectancia correspondientes a las longitudes de onda del infrarrojo cercano y del rojo (canales 2 y 1), respectivamente. Por otro lado, las imágenes resultantes del procesamiento, que originalmente presentan un formato digital de 8 bits [0,255] (CD), se transformaron a la expresión real del NDVI [-1,1] usando el valor correspondiente de ganancia (0,008) y offset (128), de acuerdo a la siguiente expresión (Agbu y James, 1994):

$$NDVI = (CD - 128) \times 0,008 \quad (2)$$

En la imagen de la Fig. 1, observamos colores desde diferentes tonalidades que configuran el paisaje del área de estudio. Desde el color amarillo que indica la presencia de elevados valores de NDVI (asociados habitualmente a una vegetación sana o con elevado contenido de humedad), que hace referencia a los sectores donde se desarrollan las actividades agrícolas como cultivos anuales y frutales principalmente. Tonalidades en verde que corresponden a cubiertas vegetales en estado de foliación, floración y fructificación como es el caso de los bosques secos y matorrales en los niveles ralo y muy ralo. Los colores azul (vegetación de colina y sombra), el color celeste que hace referencia a suelos desnudos o sectores con una vegetación arbustiva muy dispersa. Asimismo, el área ocupada por la represa Poechos, presenta valores negativos y casi nulos (cerca de -1).

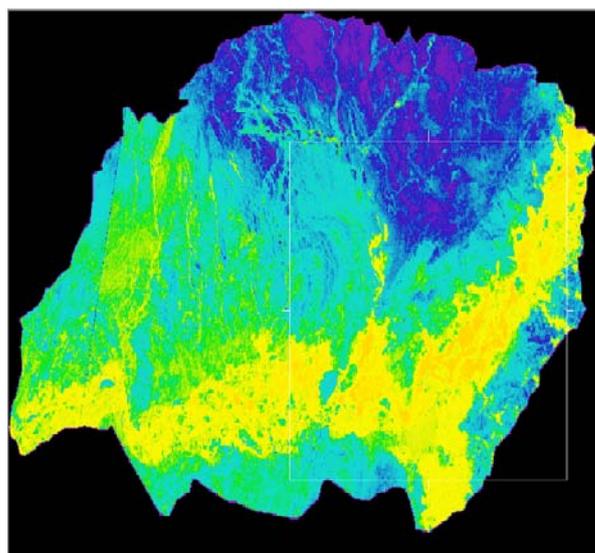


Fig. 1. Imagen según NDVI, año 2007.

Análisis de la Precipitación

Para el análisis y comportamiento de la precipitación y dadas las condiciones climáticas de la época donde fueron adquiridas las imágenes (verano mes de febrero de los años 2000, 2006, 2007), fueron considerados los datos climáticos de precipitación media con 20 años de temporalidad de las estaciones meteorológicas que más aportan información ubicadas dentro del ámbito de estudio, siendo las estaciones del SENAMHI de Mallares,

Partidor, Lancones, Miraflores. Para realizar el análisis espacial y cartográfico de las precipitaciones en el tiempo, se crearon bases de datos e integrados en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para conjuntamente ser analizados con los valores de NDVI y analizar la influencia de esta variable sobre el estado de las cubiertas vegetales y a su vez de su correspondiente fase fenológica.

Métodos de análisis Espacial

Como herramienta de análisis el uso de modelos matemáticos permite determinar el comportamiento y el patrón temporal de la variabilidad del crecimiento, ciclos de crecimiento y asociación estacional de la vegetación (Menenti et al. 1991; Azzali y Menenti 1999). La metodología aplicada en el estudio, permite realizar un análisis sencillo de la variabilidad fenológica y temporal de la vegetación. Utilizando como base el hecho de que el NDVI es un estimador del vigor y productividad de la vegetación, en ellos serán considerados los cambios en la fenología y dinámica de la vegetación monitoreando la variabilidad temporal del NDVI en los principales ecosistemas de la cuenca. Para comprender la dinámica fenológica y su interacción con la identificación del NDVI son consideradas “categorías o áreas conocidas” y “densidades” todas ellas cubiertas representativas donde se localizan ecosistemas naturales y agrícolas. Para los ecosistemas naturales fueron identificados (bosque seco de llanura, bosque seco de colina y matorral), en el caso de los ecosistemas agrícolas se clasificaron en anuales (arroz y maíz) y frutales (limón, plátano y mango). Para este tipo de análisis las cubiertas sin vegetación (centros poblados, cuerpos de agua, suelos desnudos) no fueron excluidas dado que forman parte de una categoría única asimismo por ocupar una importante área dentro del ámbito de estudio (Tabla 1).

En relación a las “densidades” estas se consideraron como ralas, muy ralas, densas y semidensas. En relación a las imágenes, fueron procesadas y desplegadas utilizando ERDAS, 9.1 (Sistema de Información Geográfica especializado en el procesamiento de imágenes de satélite). Procesa y analiza

información espacial en formato Raster y Vectorial. Los valores de NDVI para cada grupo de píxeles fueron almacenados en una hoja de cálculo para su análisis. Los valores de NDVI para cada imagen y para cada área de muestreo fueron manipulados estadísticamente y calculados desde los siguientes parámetros: promedio, valores máximos, mínimos y desviación estándar. Los valores promedios, máximos y mínimos de NDVI para cada área de muestreo de las diferentes categorías de los ecosistemas, fueron desplegadas en una gráfica cuyo eje x muestra la secuencia temporal de las imágenes en orden cronológico y el eje y los valores de NDVI.

Cada una de las gráficas según el tipo de ecosistema fue analizada eliminando las imágenes desde los valores de NDVI muy bajos (problemas de la imagen sin un patrón definido de cambios (Groten 1993a, 1993b); o las imágenes con valores diferentes a 1 en áreas de control (agua) que deberían mostrar el valor 1 para NDVI. Asimismo, fueron chequeadas cada una de las imágenes de manera visual para descartar problemas radiométricos no detectados en la selección de píxeles. Se ajustaron los puntos de las gráficas a una curva de tendencia tipo media móvil con período 2, obteniendo los modelos de variación fenológica para cada ecosistema identificado.

Áreas de muestreo seleccionadas

En la Tabla 2 se presenta la descripción de las áreas seleccionadas para cada categoría identificada. El muestreo aleatorio fue empleado en la localización de aquellas áreas representativas y almacenada dentro de una base de datos en un SIG, asimismo el conocimiento personal del área de estudio sirvió de apoyo para el desarrollo de esta etapa.

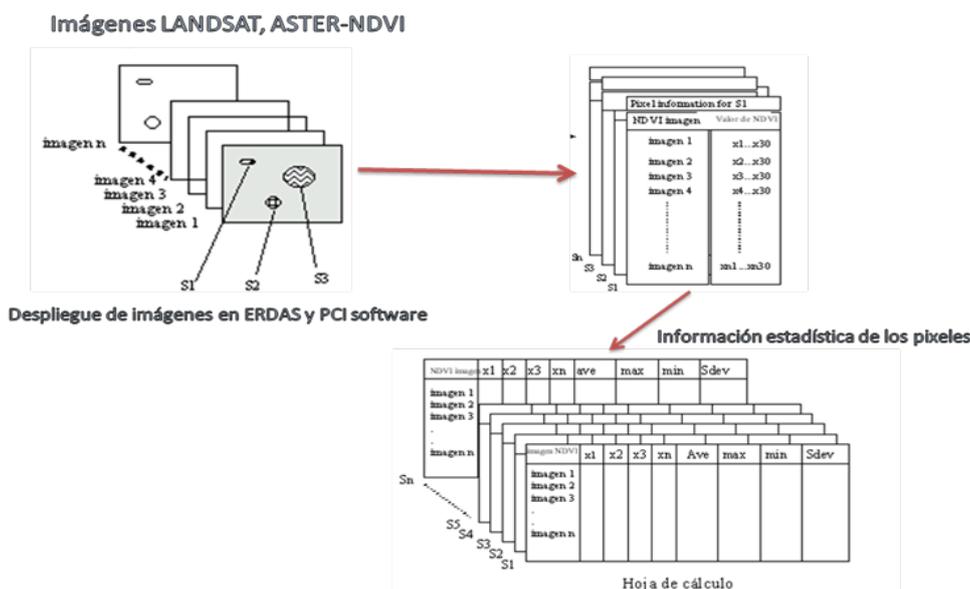


Fig. 2. Esquema Metodológico del análisis temporal para imágenes LANDSAT Y ASTER.

Tabla 1. Representación de los ecosistemas en la cuenca. Donde p=presente, pd=Presente y dominante, A=Ausente.

	Bosque seco			Matorral	Cultivos anuales		Cultivos perennes	
	Semidenso	Ralo	Muy ralo		arroz	Maíz	plátano	mango
Llanura	P	p	Pd	pd	pd	P	pd	Pd
Colina	P	A	Pd	A	A	A	A	A

Tabla 2. Sectores de muestreo según tipo de cubierta vegetal. Cód.: Código; Alt.: Altitud.

Cód.	Nombre de localidad	Ecosistema	Características	Localización	Alt.
1	Sullana (valle del chira)	Agrícola	Mango, arroz, banano	532792.73 mE 9459670.68 mS	42
2	Salitral	agrícola	Banano	535019.21 mE 9462684.88 mS	49
3	Lomas Pampas el Castillo	Bosque seco muy ralo	algarrobo	513939.46 mE 9474803.62mS	157
4	La Huaca	Agricultura	Arroz, banano	504660.60 mE 9457151.70 mS	29
5	Tamarindo	matorral	...	494503.7 mE 9459080.22 mS	43
6	El tablazo	matorral	..	494589.31mE 9453190.24 mS	70
7	Loma Colorada	Bosque seco	algarrobal	541001.84 mE 9486041.19 mS	207
8	Quebrada el faique	Bosque seco	algarrobal	531916.36 mE 9506257.60 mS	455
9	Sector Poechos	Agricultura	Arroz	553591.79 m E 9480684.18 m S	72
10	Lomas Corral de León	matorral	516919.58 mE 9468849.48 mS	81

RESULTADOS

De acuerdo a las imágenes analizadas, se presentan valores de NDVI en los rangos (-0.57_0.54), con variaciones entre las categorías de las imágenes de los años estudiados. Dichas variaciones obedecen a condiciones por un lado climáticas referidas a la ausencia de precipitaciones que tienden a ser cada vez menor hacia el año 2007 y por otro lado, al estado fenológico del cultivo. Según el análisis visual, los índices de vegetación utilizados muestran su capacidad para distinguir la curva de evolución del cultivo de acuerdo a su estado de crecimiento (desde su fase de emergencia e inicios de su desarrollo vegetativo hasta su fructificación). Un elemento identificable en este resultado hace referencia a la elevada presencia de “suelos desnudos” que influyen directamente sobre los resultados. Asimismo se observa una fuerte dependencia entre la distribución de la vegetación natural con los elementos del relieve (rangos de altitud) en la que se observa la permanencia de bosques secos en la clasificación ralos y semidensos a medida que se incrementa los niveles altitudinales (Fig. 4).

Análisis de la Precipitación

Los datos que aparecen en la Fig. 5 indican el comportamiento de la precipitación desde los

años 1994-2008. En este sentido, las observaciones registran mayores aportes de volúmenes de agua para la cuenca del río Chira concentrados durante los años 1997 y 1998 (fenomeno del niño), en la que se supera el promedio de los valores normales. En este contexto, el análisis indica una tendencia hacia la disminución de los volúmenes de precipitación en los siete años observados (condiciones de elevado déficit hídrico menores a 80mm), y por tanto a la deficiencia en los niveles según los contenidos de humedad de agua en el suelo que se mantienen constantes en los años de observación excepto los ligeros incrementos hacia el año 2007 en especial en las zonas de la cuenca media-alta.

Del resultado del análisis espacial de la precipitación, se observa una tendencia al incremento del volumen de precipitación a medida que las isoclinas se acercan a la cuenca alta (lugar donde se concentran los mayores volúmenes de precipitación) (Fig. 5).

De acuerdo a la Figura 6, en el año 2000, las isoclinas indican, precipitaciones menores a 35 mm (registrada en estación Partidor) y concentradas en la mayor parte del departamento y de las cuales progresivamente se van disipando hacia la parte mas baja de la cuenca (estaciones Mallares y La Esperanza).

LANDSAT ETM+ 2000

ASTER 2006

ASTER 2007



Fig. 3. Imágenes de verano en composición color.

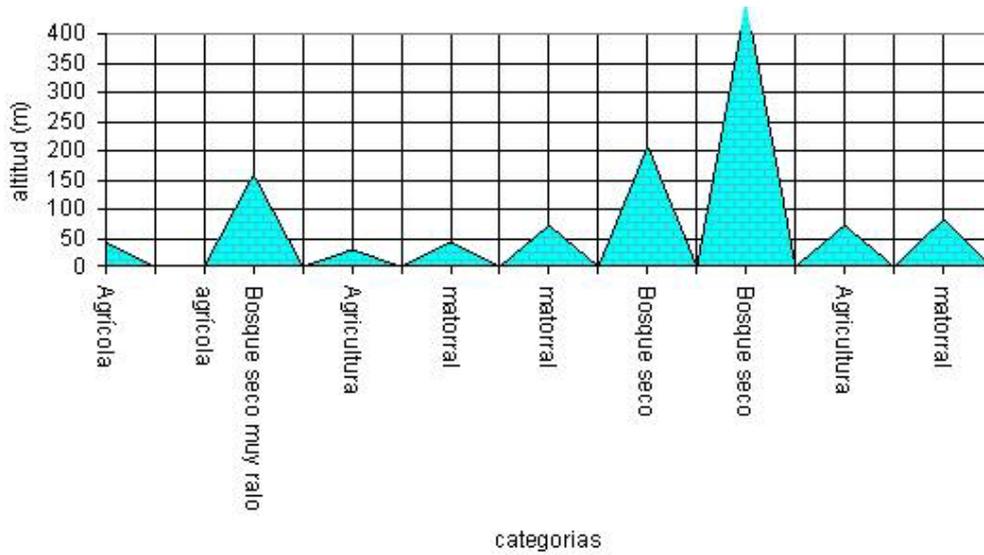


Fig. 4. Distribución de las categorías según rangos altitudinales.

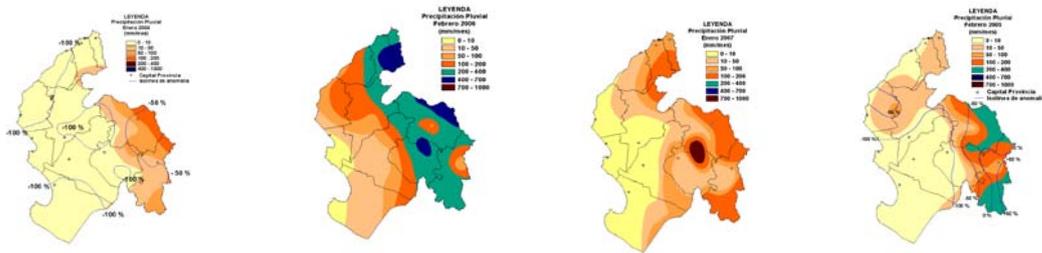


Fig. 5. Distribución espacial de las precipitaciones en la region Piura durante los años 2004,2005,2006,2007 mes de febrero.

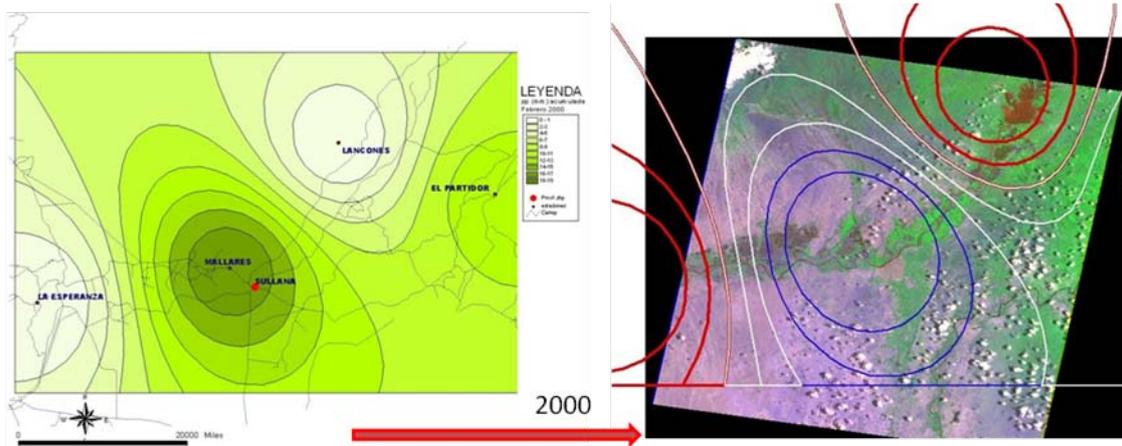


Fig. 6. Distribución espacial de la precipitación (mm) en febrero, 2000.

Hacia el año 2006 (Figura 7), la precipitación presentó una distribución espacial más homogénea hacia la zona baja de la cuenca en relación al caso anterior (menor a 20 mm), mientras que para el año 2007, la precipitación se presentó ausente o casi nula hacia la parte media y baja de la cuenca, distribución que comprende los distritos de Lancones, salitral, Querecotillo, La Huaca, Colan principalmente.

Asimismo en la misma imagen de precipitación en el año 2007 se observa relaciones entre los incrementos de los niveles altitudinales de la cuenca con las isoclinas de precipitación que se traducen en incrementos de precipitación superiores a 12 mm (Fig. 8).

Comportamiento gráfico y espacial del NDVI

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es un indicativo sensitivo de la presencia y condición de la vegetación. Situación que se expresa según los resultados obtenidos en la Tabla 3 donde se muestran los datos corregidos de los valores de NDVI estadísticamente procesados, correspondientes a determinados sectores de la imagen en los años 2000, 2006, 2007. Un elemento notable en el tiempo es la disminución del vigor de la vegetación (natural y agrícola), de 0,542 en el año 2000 a 0.168 en el año 2007, vigor reducido en relación a la disponibilidad del recurso hídrico limitado. En relación a los valores mínimos de NDVI podemos decir que estos se incrementan en el tiempo, sin embargo no entran dentro del intervalo de confianza.

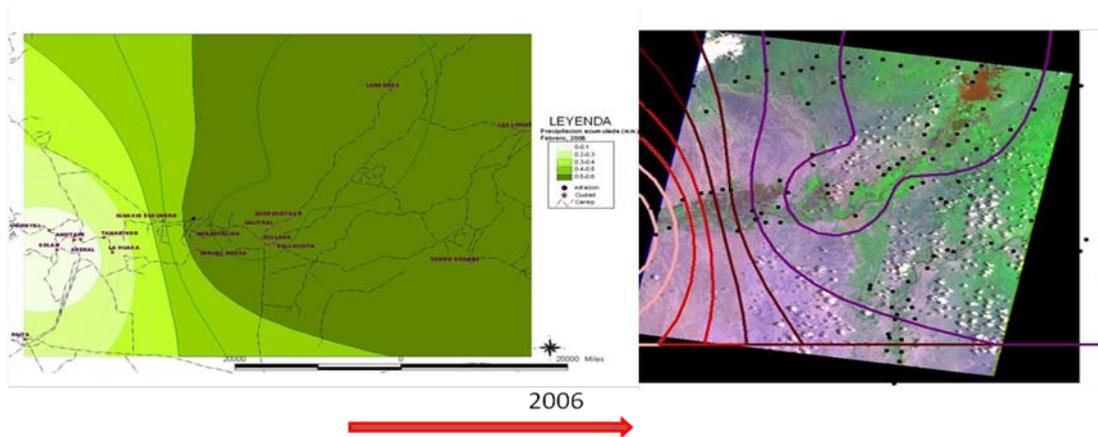


Fig. 7. Distribución espacial de la precipitación (mm) en febrero, 2006.

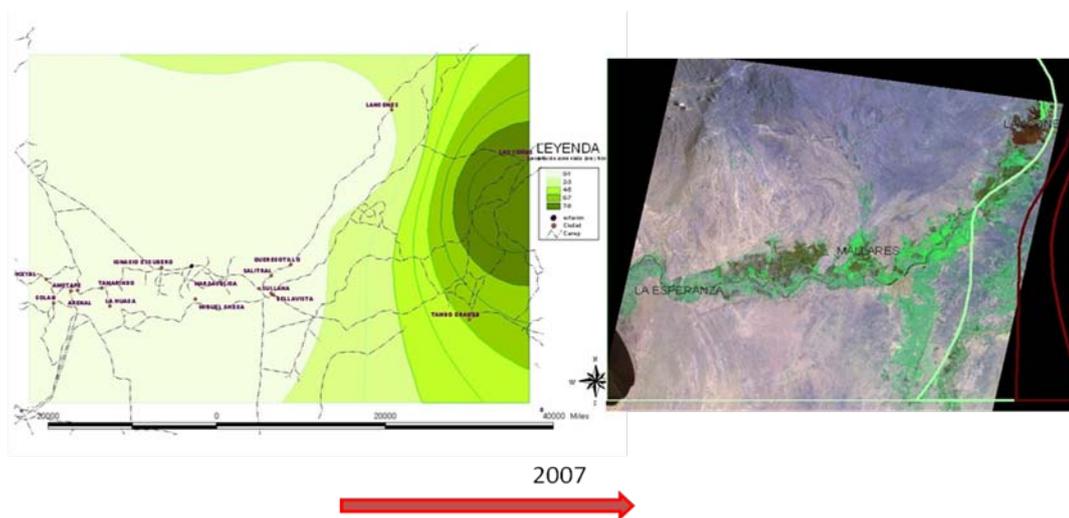


Fig. 8. Distribución espacial de la precipitación (mm) en febrero, 2007.

Tabla 3. Evolución estadística del NDVI según los años indicados

	2000	2006	2007
NDVI MAX	0,542	0,158	0,168
NDVI MIN	-0,705	-0,892	-0,905
MEDIAN	-0,081	-0,345	-0,368
STDV	0,362	0,304	0,312

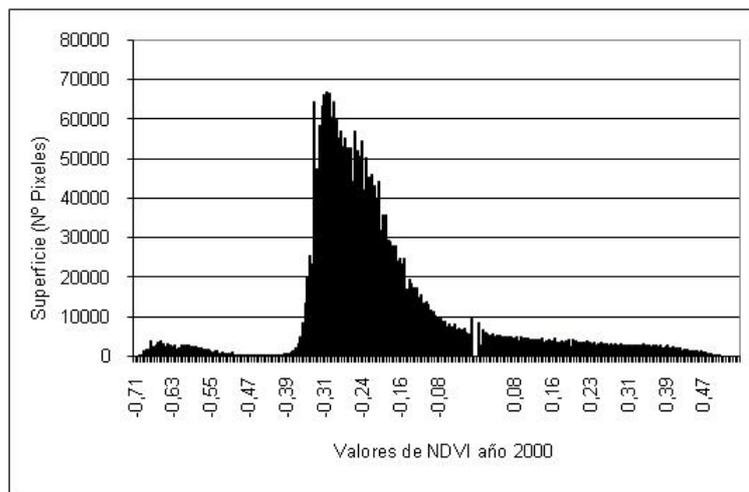


Fig. 9. Distribución según valores de NDVI de cubiertas año 2000.

En cuanto al estado fenológico de las cubiertas vegetales en los años 2000 y 2007, observamos que los mayores valores de los índices de vegetación lo ocupan los cultivos anuales (arroz en fase de macollaje en el año 2000 e inicios de emergencia hacia el año 2007) (Tabla 5). A pesar de existir variación en los valores de NDVI en el tiempo, los bosques secos presentan valores de NDVI positivos y negativos en las densidades “ralos y muy ralos”. En este sentido consideramos de la presencia del suelo desnudo que incide sobre el valor del índice las cuales se relacionan directamente con el tipo de densidad de la cubierta vegetal.

Sobre la variación espacial de la vegetación, lo más destacado es la respuesta entre la vegetación natural (bosques) y los cultivos agrícolas al ser las cubiertas mas relacionadas con el clima.

La imagen del año 2000 (Figura 10) presenta una distribución casi normal en los valores de NDVI (-0,71-0,47) para todos los elementos del medio biofísico que integran la cuenca. En el caso de la vegetación (natural o agrícola), el índice oscila entre valores

positivos y negativos (-0,31-0,54). En las especies del bosque seco, sus valores se presentan positivos y negativos según el nivel de densidad (Nº de individuos/ha) en la categoría semidenso, ralo y muy ralo (-0,54_ -0.70).

Tabla 4. Valores de NDVI año 2000 para algunas categorías

NDVI	Categoría
-0,305	Matorral
-0,261	Bosque seco muy ralo
0,161	Bosque semidenso

Según el analisis, 30 718,89 ha representan los distintos tipos de cubierta vegetal con valores positivos de NDVI y se relacionan con cultivos agrícolas anuales y permanentes (mango, banano, arroz, limón). Para las especies matorral (Tabla 4), los valores negativos de NDVI promedio (-0,27) se asocian a especies en fase de foliacion en estado bueno. Un elemento que afecta sobre los valores negativos de dicha categoria se relaciona a la presencia de suelo que

presentan una elevada reflectividad al presentar niveles según densidades “muy malo”.

Tabla 5. Valores de NDVI promedio para la categoría cultivos anuales y frutales año 2000.

NDVI promedio	Categoría	Fase fenológica
0,420	Arroz	Desarrollo vegetativo
0,356	Banano	Retoño
0.176	mango	Fructificación

En relación a los resultados (fenología-NDVI), se observan variaciones dependiendo de la fase fenológica dominante. Así, los cultivos bajo riego (registran valores positivos de NDVI en la imagen del año 2000 sobre los sectores situados en el valle de “El Chira” cerca de Sullana), donde se encuentran instalados cultivos anuales y perennes como frutales como es el caso del banano con valor promedio de (NDVI= 0,356) que se encuentran en fase fenológica de retoño y maduración del fruto, seguido del cultivo de mango (0.176) en fase de fructificación y maduración (Tabla 5).

Para el año 2006, las cubiertas vegetales presentan una distribución bimodal en sus valores de NDVI y un comportamiento distinto en relación a la configuración del paisaje del año 2000. Solo se observan valores negativos en las especies forestales y matorrales (-0,873_-0,918). Los cultivos anuales se encuentran prácticamente iniciando su periodo vegetativo, o algunos terrenos en descanso siendo esta condición una de las razones por las cuales se explica los bajos valores de NDVI en la cual la reflectividad es mayor en estas condiciones. Para frutales la mayoría de ellos en fructificación y maduración como es el caso del mango o retoño como el banano los valores de NDVI se presentan en promedio (NDVI=0,20).

La situación de la imagen del año 2007 presenta una distribución normal de sus valores de NDVI pero con una tendencia hacia valores negativos muy similar al año 2006 donde prácticamente la regeneración natural por ausencia de precipitaciones se

minimiza permitiendo que el suelo se encuentre desprovisto de vegetación principalmente la arbustiva. En cuanto a los rangos de NDVI estos se encuentran entre (-0,90_0,12), donde los valores positivos de NDVI (0,12) apenas ocupan una superficie de 3 ha (Figura 10) y hacen referencia a cultivos de mango en fase de maduración. Para los cultivos anuales (algodón, maíz, arroz) estos presentan valores negativos (-0,79_-0,80) encontrándose la mayoría en descanso o iniciando su fase fenológica o en emergencia.

Para las especies matorrales y bosques se observa una variación de los valores (tanto por su densidad como por su altitud). Los valores más altos de NDVI se presentan sobre el sector más cercano a la cuenca alta donde la densidad (nº individuos/ha) es mayor que aquellos situados en las zonas bajas donde predominan la categoría de bosques secos muy malos. En este sentido, la disminución generalizada de los valores de NDVI ocasionados por la falta de agua para mantener su productividad (estrés por déficit de agua en el suelo) se mantiene latente.

Análisis Temporal

En la Figura 12 se presenta el comportamiento fenológico de los cultivos durante los años (2000-2007). Las especies de algarrobo (*Prosopis pallida*), de manera general se encuentra en fase de fructificación (9) y maduración (10) en los sectores Mallares y La Esperanza en los años 2000-2006. No obstante para sectores como Lancones, la especie presenta una mayor variabilidad en el desarrollo de su fenología en los años de observación (desde fructificación en la imagen del año 2000, inflorescencia en imagen del año 2006 y fructificación en la imagen del año 2007).

Los cultivos anuales instalados (arroz, maíz), principalmente indican un inicio en su desarrollo (emergencia, aparición de hojas y macollaje). No sucede lo mismo en el caso de frutales como el mango, limón, banano que ocupan importantes áreas en la zona de estudio y en su mayoría se encuentran en fase de fructificación (9).

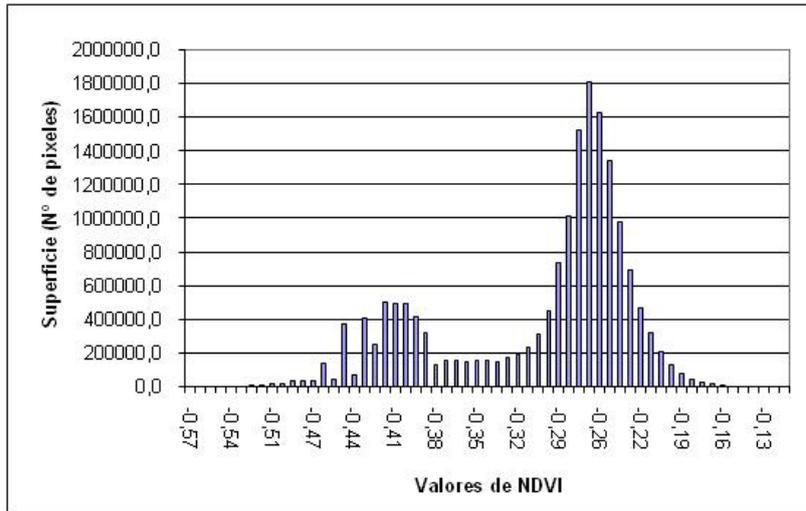


Fig. 10. Distribución según valores de NDVI de cubiertas de bosques secos año 2006.

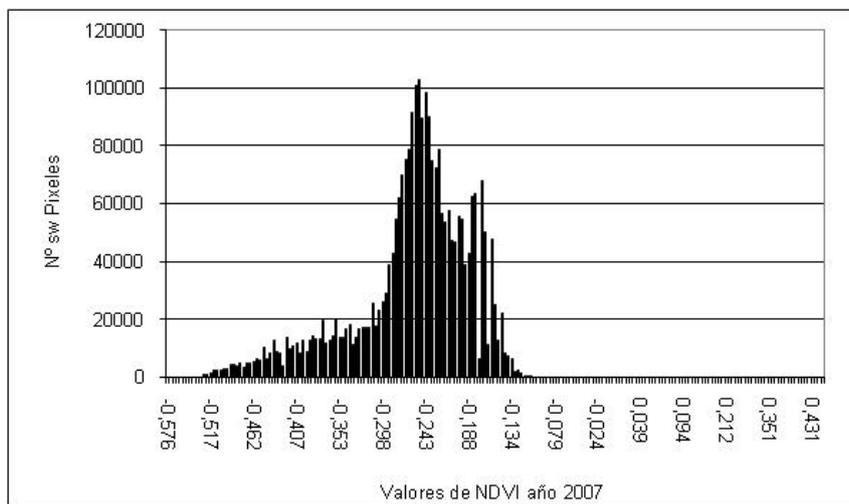


Fig. 11. Distribución de los valores de NDVI en la imagen del año 2007.

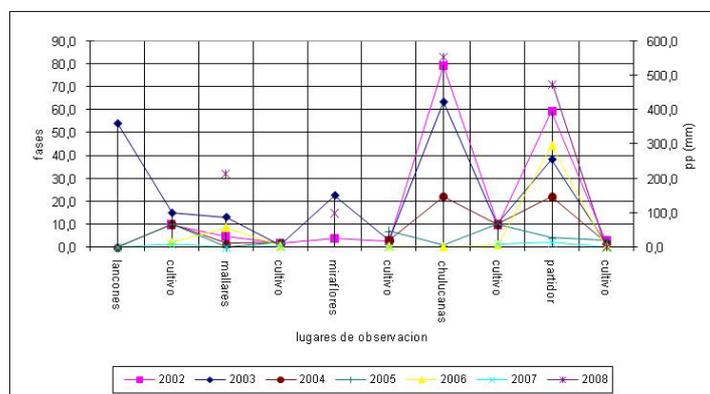


Fig. 12. Fenología de los cultivos y volumen de precipitación.

Del análisis anterior, y para poder explicar porque la variación del NDVI en el tiempo y porque las imágenes de los años 2006 y 2007 no presentan valores positivos de NDVI, analizamos la distribución espacial del NDVI en relación al comportamiento de la precipitación y las tendencias fenológicas de las especies instaladas (naturales o agrícolas) (Figura 12). Se observa una fuerte tendencia hacia el descenso de los valores de NDVI desde las imágenes del año 2000 hasta la imagen del 2007 donde los valores de NDVI no presentan valores positivos en ninguna de las cubiertas analizadas. Dichos valores se ajustan a las condiciones de descenso de las precipitaciones en los años observados. De ello, las precipitaciones (período de lluvias de febrero 2000 a febrero del 2007) y los valores de NDVI presentan valores medios de (-0,08 en el ámbito de la cuenca que tiende a disminuir hacia el 2007 con un valor medio (-0,64 en el año 2006) y (-0,43 en el año 2007). Resultados que se asocian con el volumen de precipitación mínima en ese período reflejado a su vez en el descenso de los valores de NDVI en fase de fructificación.

Análisis de cambio 2000-2007

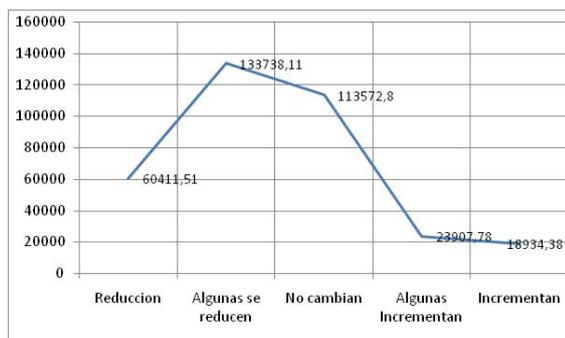


Fig. 13. Análisis de cambio.

En relación a los cambios del territorio en el ámbito de la cuenca observamos que un 38,14% se ha transformado durante los años de estudio. De ello un 17% de las cubiertas destinadas a agricultura han disminuido por encontrarse sus terrenos en descanso o iniciando su campaña agrícola. Asimismo, 113572,8 ha que equivale al 38% de la superficie de la cuenca no han sufrido

cambios. Solo un 5% de la superficie de la cuenca sufren incrementos (no solo a nivel de expansión de la frontera agrícola sino también al incremento de la presión urbana).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dado que el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) permite estimar el desarrollo de la vegetación con base en la medición, con sensores remotos, de la Intensidad de ciertas bandas del espectro electromagnético que la misma emite o refleja, la interpretación de los resultados bien como imágenes aisladas, bien como mapas de cambio, puede amoldarse a diversas necesidades. El análisis estadístico mediante gráficos e índices de los datos satelitales multiespectrales es sumamente efectivo para identificar y discriminar las coberturas de interés agrícola y forestal seleccionadas, principalmente entre especies del ecosistema de bosque seco. Un elemento importante desde el punto de vista metodológico se relaciona a la incidencia de la resolución espacial para la discriminación de coberturas la cual representa un factor condicionante, en este caso del sensor ETM+ del satélite Landsat y las bandas del infrarrojo del satélite ASTER las cuales, es de 30 m x 30 m en el modo multiespectral.

En el ámbito agrícola, los mapas de cambio de vegetación pueden emplearse para identificar lugares que han sufrido cambios en la respuesta espectral de un cultivo dado, o bien, de una zona determinada.

El mapa identifica lugares específicos donde han ocurrido cambios Índice Normalizado de Vegetación negativos y positivos en la respuesta espectral vegetativa, a través del uso del NDVI. Estos mapas se realizan a partir de datos anuales que en este caso de trata de la misma temporada (verano). Cuando se realizan de manera continua, se puede determinar la evolución de diferentes zonas. Por otro lado, los resultados obtenidos pueden interpretarse con la ayuda de la información meteorológica y de uso de suelo disponible para la zona, y así dar seguimiento a la transformación anual de la cobertura de cultivos y otros tipos de vegetación. También se pueden evaluar las características del

paisaje, como zonas degradadas o inundaciones.

En función de estas interpretaciones, puede realizarse la planificación integral de una zona de interés mediante la determinación y diferenciación de ambientes productivos, generar otros productos todavía más específicos, como mapas de aplicación de fertilización según condiciones locales.

Los resultados presentados indican que el sector estudiado que forma parte de la cuenca del río Chira está sufriendo un proceso de transformación que se va acentuando por la actividad agrícola en desmedro de los ecosistemas de bosques secos las cuales se encuentran fuertemente amenazadas por el incremento de la actividad agrícola.

En relación al uso de las imágenes de satélite (LANDSAT y ASTER), proveen datos valiosos que pueden ser relacionados con información de campo para desarrollar metodologías de monitoreo del estado fenológico de los cultivos especialmente de especies del bosque seco (poco estudiadas). Asimismo, el mecanismo fenológico, fuertemente asociado con la disponibilidad de agua, resulta crítico para determinar la época más apropiada de adquisición de imágenes satelitales. En relación a las herramientas complementarias, los Sistema de Información Geográfica son fundamentales para coleccionar la información de los valores de NDVI de las distintas áreas seleccionadas. De manera general el análisis de la distribución espacial del NDVI varía con el tiempo. Asimismo, su no linealidad del NDVI sobre superficies parcialmente cubiertas por vegetación pone en relevancia sus resultados en función de la presencia del suelo entre las plantas y las sombras que proyectan (Jiang et al., 2006). De esta manera se detecta un patrón de variación en cada ecosistema que se relaciona e interpreta con los cambios de la precipitación y su tendencia durante el período de tiempo estudiado.

Los valores muy bajos de NDVI (negativos) en los años analizados, indican la presencia de vegetación verde pero con escasa disponibilidad de agua, resultados que se relacionan con lo obtenido por Manrique, 1999 en zonas áridas. La interpretación de los patrones de variación fenológica puede servir para la selección y clasificación de imágenes con la finalidad de elaborar mapas ecológicos cuyas unidades representen los diferentes

ecosistemas más predominantes del área de estudio y las características más sobresalientes sobre su estructura y función como elementos del paisaje.

Agradecimientos: La presente investigación fue financiada por el Gobierno regional de Piura a través del proyecto Monitoreo de los Ecosistemas Agrícolas y Naturales en la Región Piura desde las tecnologías: Teledetección y Sistemas de Información Geográfica en la Cuenca del Río Chira (Piura-Peru). Agradecimiento a S. T. por la revisión de este documento.

BIBLIOGRAFÍA

Aronoff, S. (1993). Geographic Information System: A management perspective. WDL Publications, Canada.

Chuvieco, S. E. (2008). Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial ARIEL. 230 Pp.

Dedios, M.N. (2005). Evaluación de los niveles de degradación desde el sensor Thematic Mapper en los ecosistemas de bosque seco y su caracterización en la costa norte de Piura-http://www.darwinnet.org/docs/degradacion_ninel1.pdf

Groten, S.M.E. (1993a). From monitoring to management - experiences from NOAA-NDVI application research in semi-arid Africa. Proc int symp operationalization of remote sensing. Enschede, 4:15-26.

Groten, S.M.E. (1993b). Earth observation for ecologic hazard mitigation and prevention. ITC journal. 1993-4.

Hobbs, R.J. (1989). Remote Sensing of Spatial and Temporal Dynamics of Vegetation. In Hobbs, R.J. and Mooney, H.A. (eds). Remote Sensing of Biosphere Functioning. Ecological Studies 79. Springer-Verlag, Berlin.

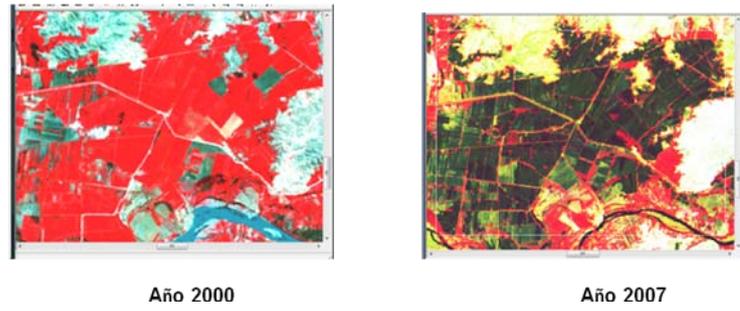
Huber, O. and Alarcón, C. (1988). Mapa de vegetación de Venezuela, Escala 1:2.000.000. Editorial Arte, S.A., Caracas.

Menenti, M., Azzali, W., Verhoef, W. And Van Swol, R. (1991). Mapping Agro-Ecological Zones and Time Lag in Vegetation Growth by means of Fourier Analysis of Time Series of NDVI Images. Rep 32, DLO-Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands, 46 pp.

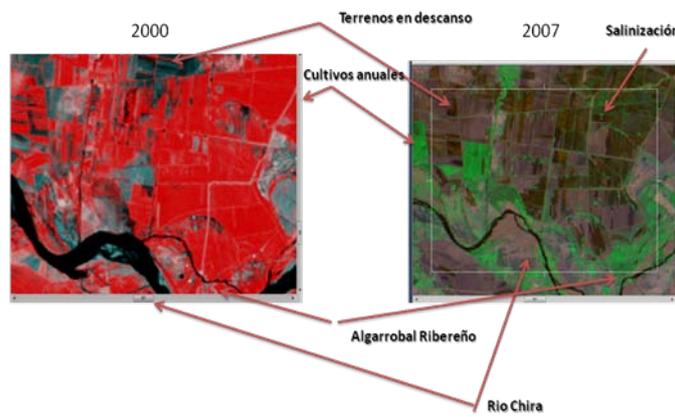
Monasterio, M. and Sarmiento, G. (1976). Phenological strategies of plant species in the tropical savanna and the semi-deciduous forest of the Venezuelan Llanos. Journal of Biogeography 3: 325-356.

Manrique, E.G (1999). Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. Teledetección Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de teledetección. Albacete-España. Pp 217-219.

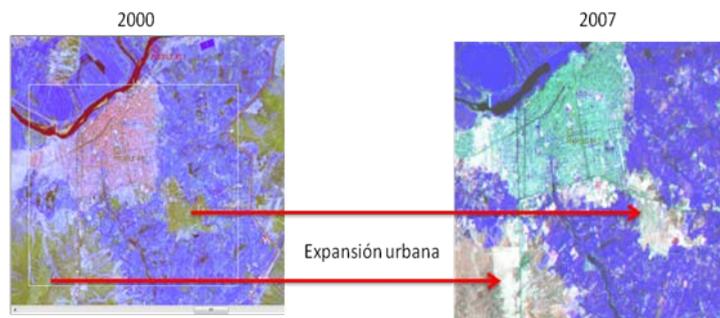
Ortiz, M. (2007, 29 de agosto). Recursos del Reservorio de Poechos están en el Límite. Diario



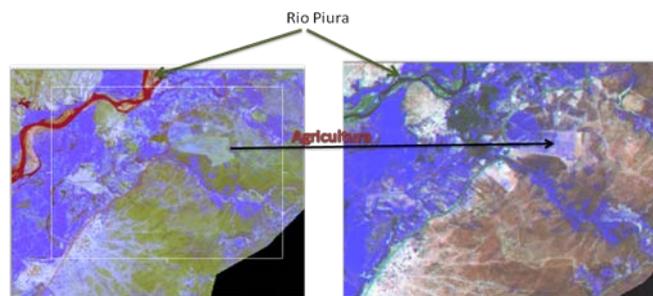
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 14. (a),(b),(c),(d) Generación de NDVI multitemporal LANDSAT Y ASTER (2000, 2006,2007).

El Comercio (versión electrónica).
<http://www.elcomercio.com.pe/edicionimpresa/Html/2007-08-29/imececonomia0777314.html>.
Lima, Peru.

Running, S.W. (1989). Estimating Terrestrial Primary Productivity by Combining Remote Sensing and Ecosystem Simulation. In Hobbs, R.J. and Mooney, H.A. (eds). Remote Sensing of Biosphere Functioning. Ecological Studies 79. Springer-Verlag, Berlin.

Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring

vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, v. 8, p.127-150.

Tucker, C. J., W. W. Newcomb, S. O. Los, and S. D. Prince (1991). Mean and inter-year variation of growing-season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981-1989. *International Journal of Remote Sensing*, v. 12, p.1113-1115.