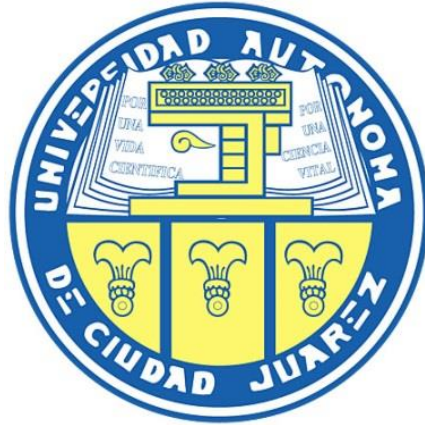




UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CIUDAD JUAREZ

Instituto de Arquitectura Diseño y Arte

**ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA
ACTIVIDAD VEGETAL EN ÁREAS DE MANGLAR (1990-2010):
DELTAS DE LOS RÍOS YAQUI Y MAYO EN SONORA, Y RIO
FUERTE EN SINALOA, MÉXICO.**

Proyecto de Titulación:

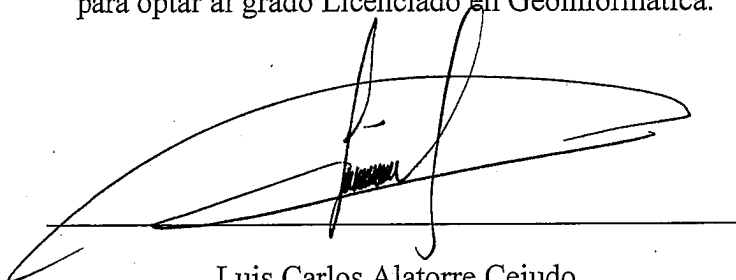
Sonia Miramontes Beltrán
Ramiro José Medina Enríquez

Como requisito parcial para obtener el grado de
Licenciado en Geoinformática

Cd. Cuauhtémoc, Chih.

Mayo de 2014

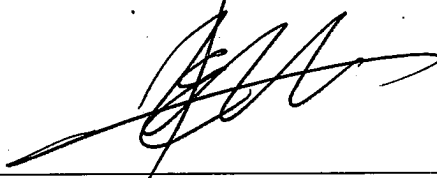
Este proyecto de titulación fue aceptado por el comité revisor designado por la academia del programa de Geoinformática de la Universidad Autónoma de Cd. Juárez, como requisito parcial para optar al grado Licenciado en Geoinformática.



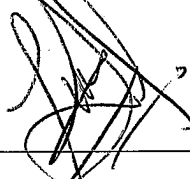
Luis Carlos Alatorre Cejudo
Dr. En Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente
Director de Proyecto de Titulación



Luis Carlos Bravo Peña
Dr. En Ciencias Opción en Desarrollo Regional
Sinodal Titular



María Elena Torres Olave
Dra. En Ciencias y Tecnología Ambiental
Sinodal Titular



Lara Cecilia Wiebe Quintana
M.C. En Ingeniería Electrónica
Sinodal Suplente

Mayo de 2014

Dedicatoria

Sonia Miramontes Beltrán

Primeramente a Dios por haberme dado la sabiduría, el entendimiento y la fortaleza. A mis padres porque con su esfuerzo, dedicación, apoyo, comprensión y amor han sido mi guía e inspiración para superarme. A mi hermana por haber fomentado en mí el deseo de superación y el anhelo de triunfo en la vida. A mis sobrinas por alegrar mis días y ser mi inspiración. A mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Mil palabras no bastarían para agradecerles su apoyo, comprensión y consejos. Con todo mi cariño va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí.

Ramiro José Medina Enríquez

Con todo mi amor para las personas que me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque han hecho todo lo posible para que vaya logrando mis sueños, por motivarme a no desistir y brindarme su apoyo cuando las cosas se complicaban, a ustedes con todo mi cariño y agradecimiento.

Papa y mama

Gracias a mis hermanas por ser tan importantes en mi vida, por estar siempre presentes para brindarme su ayuda, por ser la razón e inspiración para superarme en la vida. A mi sobrina quien ha traído felicidad, inspiración y motivación a mi vida. Con todo mi corazón para ustedes.

Agradecimientos

El presente Proyecto de Titulación es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron varias personas, leyendo, opinando, corrigiendo, teniéndonos paciencia, dándonos ánimo, acompañando en los buenos y malos momentos.

Al Dr. Luis Carlos Alatorre por haber confiado en nosotros, por la paciencia y por la dirección de este trabajo. A la Dra. María Elena Torres por los consejos, el apoyo y el ánimo que nos brindó y a cada uno de los docentes que directa o indirectamente contribuyeron en nuestro logro, Dr. Luis Carlos Bravo, M.C. Lara Cecilia Wiebe, M.C. Hugo Rojas, Dr. Raúl Chacón, Dr. Elifalet Lopez.

A nuestros compañeros que nos apoyaron y nos brindaron su amistad durante este ciclo.

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA ACTIVIDAD VEGETAL EN ÁREAS DE MANGLAR (1990-2010): DELTAS DE LOS RÍOS YAQUI Y MAYO EN SONORA, Y RIO FUERTE EN SINALOA, MÉXICO.

Sonia Miramontes¹, Ramiro J. Medina¹

¹División Multidisciplinaria de la UACJ en Cuauhtémoc, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), Carretera Cuauhtémoc-Anáhuac Km 61.5, Calle Ejército Nacional 5220 Col. Ejido Anáhuac C.P. 31600, Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

Resumen. Se analizó la evolución temporal de la actividad vegetal de áreas de manglar en los deltas de los ríos Yaqui y Mayo en Sonora, y Rio Fuerte en Sinaloa, México a través de un análisis multitemporal de imágenes Landsat 7 ETM+, para el periodo 1990-2010. A partir de las imágenes se obtuvo una serie temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en inglés), también se construyó una serie temporal de variables climatológicas para evaluar la actividad vegetal en zonas de manglar. Los resultados demostraron por medio de un análisis de regresión multivariante que existen tendencias negativas estadísticamente significativas de la actividad vegetal en la cobertura de manglar, sin embargo, no se

encontró ninguna variable climatológica que controle las tendencias observadas. Finalmente mediante un análisis de tendencias pixel a pixel, con el uso de la técnica de Mann Kendall, más la digitalización de las granjas camaronícolas en el área de estudio, se pudo relacionar espacialmente la correspondencia de las zonas con mayor pérdida en su actividad vegetal para el periodo 1990-2010 con las zonas donde ha sido mayor la proliferación de granjas camaronícolas en el área de estudio.

Palabras Clave. Sensoria Remota, Análisis de Evolución Temporal, NDVI, manglar, granjas camaronícolas.

ANALYSIS OF THE TEMPORAL EVOLUTION OF VEGETAL ACTIVITY IN MANGROVE AREAS (1990-2010): DELTA OF YAQUI AND MAYO RIVERS IN SONORA AND RIVER FUERTE IN SINALOA, MEXICO.

Abstract. The temporal evolution of vegetation activity of mangrove areas in the deltas of the Yaqui and Mayo rivers in Sonora and River Fuerte in Sinaloa, Mexico were analyzed using multitemporal analysis

of Landsat 7 ETM + images for the period 1990 – 2010. From the images a time series of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and time series of weather variables were built to evaluate vegetation activity in

mangrove areas. The results demonstrated by a multivariate regression analysis that there were statistically significant negative trends in vegetation activity in mangrove cover, however, no climatological variables that control the observed trends were found. Finally, by analyzing trends pixel by pixel, using the Mann Kendall, plus the digitization of shrimp farms in the study area, it was possible to spatially relate the

INTRODUCCIÓN

Los humedales costeros son ambientes complejos y dinámicos donde se desarrollan los bosques de manglar, uno de los ecosistemas más productivos de la biosfera. Los manglares poseen un alto valor ecológico y económico por lo que es de suma importancia conservarlos (Day *et al.*, 1989). Datos publicados por la FAO basados en numerosos estudios, revelan que México tiene la mayor tasa de deforestación de manglar en la región de América Central con pérdidas superiores a los 100 km² anuales (FAO, 2003).

México ha sufrido una deforestación de manglares significativa desde 1980 debido al crecimiento de la acuicultura. Según Alday (1999) y Valenzuela *et al.* (2002), la camaronicultura ha crecido de manera importante en las últimas dos décadas, aportando volúmenes considerables a la producción pesquera total a nivel mundial, asimismo ha influido en la organización de la trama social y en la economía de las regiones.

La reciente expansión del cultivo del camarón, ha generado efectos negativos

correspondence of areas with the greatest loss in vegetative activity for the period 1990 – 2010 with the areas that had greater proliferation of shrimp farms in the study area.

Keywords. Remote Sensing, Analysis of Time Evolution, NDVI, mangrove, shrimp farms.

sobre el medio ambiente y su sustentabilidad (Tobey *et al.*, 1998), como son:

- Utilización de los ecosistemas de manglares para la construcción de estanques y su empleo por pocos años, según el estilo de roza y quema y posterior desplazamiento a otras áreas.
- Salinización de las aguas subterráneas y tierras agrícolas.
- Contaminación de aguas costeras por efecto de las descargas de los estanques.
- Excesos en el uso de harinas de origen marino, conduciendo a un aprovechamiento ineficiente de fuentes vitales de proteína y a la alteración de los ecosistemas marinos.
- Preocupación por la biodiversidad, como resultado de la recolección de semilla y reproductores silvestres e introducción de especies exóticas con agentes patógenos asociados.

- Conflictos sociales con otros usuarios de los recursos naturales.
- Descargas de las granjas, causando auto-contaminación en las áreas de cultivo.

Para el estudio de estas áreas de tan importante valor ecológico y económico, los Sistemas de Información Geográfica (SIG), la sensoria remota (SR) y mapeo tienen un papel importante en todos los aspectos geográficos y espaciales del desarrollo y gestión de los estuarios y sistemas costeros (Henderson *et al.* 1999; Muttitanon & Tripathi 2005). Los sensores satelitales, aéreos, terrestres y submarinos adquieren muchos de los datos relacionados, especialmente sobre temperatura, concentración de clorofila y uso de aguas y tierras. Los SIG se utilizan para manipular y analizar datos espaciales y propiedades de los datos procedentes de las distintas fuentes, así como para producir reportes en formato de mapas, bases de datos y textos que faciliten los procesos de toma de decisiones (FAO, 2009). Debido a lo anteriormente descrito, la SR es una herramienta ideal para el seguimiento de la evolución espacial y temporal de los ecosistemas de manglares, ya que es rentable, eficiente en el tiempo, y no invasivo (Acosta, 2010).

Los datos espectrales obtenidos de plataformas espaciales, particularmente las longitudes de onda localizadas en la región del rojo e infrarrojo cercano se han utilizado para detectar cubiertas vegetales y para dar seguimiento a la actividad vegetal mediante índices de vegetación que utilizan estas

regiones del espectro electromagnético (Alatorre *et al.*, 2011). Uno de los índices espectrales más usados para evaluar las respuestas ecológicas frente a cambios ambientales (Paruelo 2008) es el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). El NDVI tiene un gran valor en términos ecológicos, ya que es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación (Monteith 1981) y la productividad primaria (Paruelo *et al.* 1997; Tucker *et al.* 1985), una variable integradora del funcionamiento del ecosistema (Virginia y Wall 2001). Las series temporales de NDVI con alta resolución temporal permiten monitorear diferentes indicadores sintéticos de la dinámica de la intercepción de radiación por parte de la vegetación terrestre, tales como el promedio anual, la estacionalidad, la fenología del ecosistema, y la estabilidad, con los que caracterizar y monitorear diferentes aspectos del funcionamiento de los ecosistemas (Alcaraz-Segura, 2008; Alatorre *et al.*, 2011).

Existen estudios previos en donde se han realizado clasificaciones para cuantificar las áreas de manglar, (De la Fuente y Carrera, 2005; Berlanga y Ruiz, 2007). De la Fuente y Carrera, 2005 realizaron un estudio de la zona costera de Sinaloa mediante SR, por el cual obtuvieron dos cartografías correspondientes a los años de 1992 y 2003, es decir once años de diferencia. Ellos encontraron que la principal causa de pérdida/cambio dentro de la zona costera, estuvo representado por la construcción de granjas para la producción de camarón.

Berlanga y Ruiz, (2007) realizaron un estudio similar en el sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, por medio de SR, analizaron las tendencias de cambio de manglares en un periodo que comprende los años 1973 al 2000 en cinco escenas que corresponden a los años 1973, 1986, 1990, 1995 y 2000. Coincidiendo en que la disminución de áreas de manglar se debe principalmente a la presencia de granjas camaronícolas.

A diferencia de estos estudios, donde el objetivo fue hacer un análisis estático del cambio de cubiertas utilizando solo dos y cinco fechas, en esta investigación el objetivo fue hacer un análisis de la dinámica de la actividad vegetal sobre áreas de manglar, mediante la utilización de una serie temporal de imágenes Landsat TM desde el año 1990 al 2010, más la determinación del NDVI para determinar si los cambios observados tienen correlación con variables climatológicas, o estos cambios pueden tener su origen en la proliferación de granjas camaronícolas, todo esto mediante la utilización de SR y SIG.

Esto para confirmar la hipótesis, que la zona del manglar localizada en Deltas de los ríos Yaqui y Mayo en Sonora, y Río Fuerte en Sinaloa, México, han presentado una pérdida de la actividad vegetal y pérdida de cubierta, lo cual se relaciona con los procesos de degradación ambiental ocasionados por la inserción de granjas camaronícolas en estas áreas costeras.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca la región noroeste de México, una franja de 509 km de la costa este del Golfo de California, aproximadamente un área de 5,000 km² (Figura 1). Esta región incluye los manglares asociados a los deltas de los ríos Mayo, Yaqui y Fuerte, siendo esta una zona de mayor extensión de humedales en el noroeste Mexicano. El clima de la zona es cálido y seco, con una temperatura media anual de 24 ° C (rango de 16 a 48 ° C) y la precipitación es inferior a 300 mm año⁻¹ (Alatorre, *et al.* 2011).

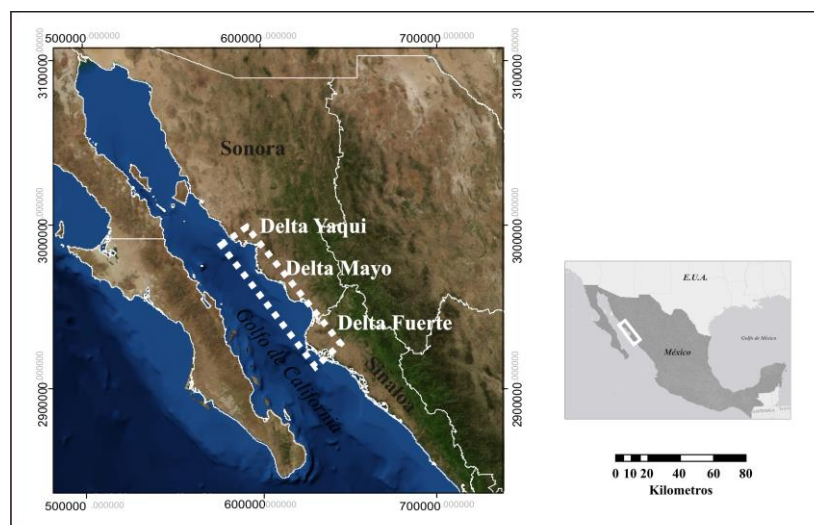


Figura 1. Delimitación del área de estudio.

Los humedales de manglar en el área de estudio están formados principalmente de boques mixtos de *Rhizophora mangle*, *Avicennia germinans* y *Laguncularia racemosa*. *Rhizophora mangle* se limita principalmente a las zonas del litoral de lagunas y se produce en asociación con los parches de hierba salmuera (*Salicornia virginica* y *Batis maritima*) en piscinas muy superficiales y pequeñas (Alatorre *et al.*, 2011).

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección y Preparación de la Base de Datos

Para la determinación de la distribución espacial de la cobertura de manglar en el área de estudio, se utilizó la cartografía de coberturas y uso de suelo generada por Alatorre *et al.* (2011, Figura 2). La cartografía consta de siete categorías: i) manglar; ii) manglar con salicornia; iii) salicornia; iv) vegetación dispersa; v) agua superficial; vi) agua profunda; y, vii) suelo desnudo.

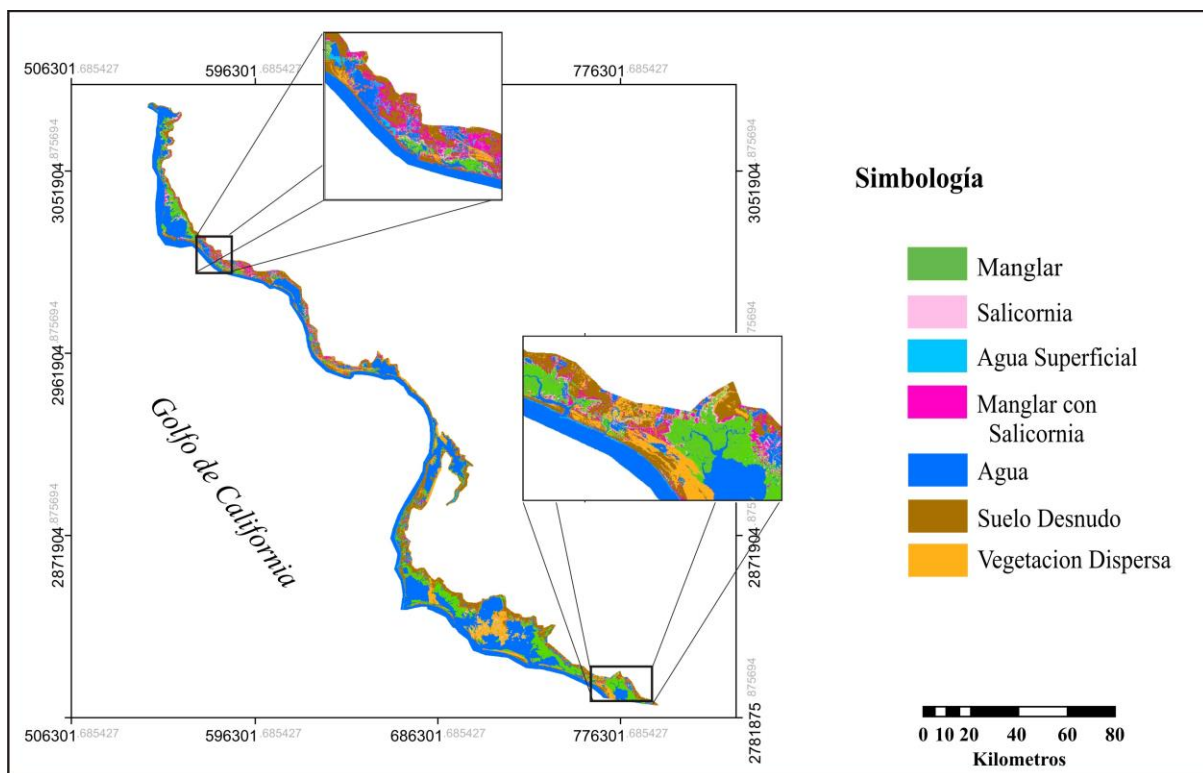


Figura 2. Cartografía de coberturas de usos de suelo. (Alatorre *et al.*, 2011)

Para la construcción de la serie temporal homogenizada de imágenes Landsat 7

ETM+ con proyección UTM (Universal Transversal Mercator) 12 N.; se buscaron las

cuatro escenas que cubren el área de estudio (Alatorre *et al.*, 2011), para cada uno de los años del periodo 1990-2010, y para los meses mayo-junio (inicios de primavera) para cubrir el área de estudio (Tabla1 y 2).

Tabla 1. Fechas de las imágenes Landsat 7 ETM+ utilizadas para construir el mosaico que cubre toda el área de estudio.

MOSAICO	Imagen A	Imagen B	Imagen C	Imagen D
1	14/05/1990	16/05/1990	13/05/1990	05/04/1990
2	19/05/1992	26/05/1992	26/05/1992	06/02/1992
3	14/05/1993	22/06/1993	05/05/1993	13/06/1993
4	05/01/1994	25/06/1994	06/09/1994	15/05/1994
5	06/05/1995	06/12/1995	06/12/1995	19/06/1995
6	26/06/1997	17/06/1997	17/06/1997	24/06/1997
7	28/05/1998	05/03/1998	05/03/1998	05/10/1998
8	06/05/2001	28/06/2001	28/06/2001	06/03/2001
9	05/07/2002	14/05/2002	14/05/2002	21/05/2002
10	27/06/2003	18/06/2003	06/02/2003	06/09/2003
11	13/06/2004	06/04/2004	05/03/2004	06/11/2004
12	15/05/2005	05/06/2005	05/06/2005	13/05/2005
13	18/05/2006	25/05/2006	25/05/2006	16/05/2006
14	21/05/2007	29/06/2007	13/06/2007	20/06/2007
15	05/07/2008	14/05/2008	30/05/2008	06/06/2008
16	26/05/2009	17/05/2009	17/05/2009	05/08/2009
17	29/05/2010	05/04/2010	05/04/2010	27/05/2010

Tabla 2. Datos geográficos de las imágenes Landsat 7 ETM+ para construir el mosaico que cubre toda el área de estudio.

	Path/Row	Xmin/Xmax	Ymin/Ymax
Imagen A	33/42	664785/895815	2772285/2981415
Imagen B	34/41	545685/778515	2928285/3139215
Imagen C	34/42	511785/744915	2768985/2980215
Imagen D	35/41	391185/625515	2925885/3138615

Las correcciones que se deben aplicar a las imágenes tienden a eliminar los ruidos causados a la señal que llega al satélite luego

de haber atravesado la atmosfera, el efecto de la distorsión de la señal produce errores en la localización como en los ND (números digitales) de los pixeles. Pueden presentar alteraciones radiométricas y geométricas de forma que no coincida con el tono, posición y tamaño de los objetos (Chuvieco, 1996).

Los efectos atmosféricos pueden ser sustanciales por lo que se ofrecen varios enfoques para la corrección atmosférica (Eastman, 2004). Para la homogenización de las imágenes de la serie temporal se utilizó el software Idrisi Selva mediante el módulo ATMOSC y se seleccionó el modelo Cos(t), el cual es una mejora del modelo de Sustracción del Objeto Oscuro (DOS) (Eastman et al. 2004). El modelo Cos(t) propuesto por Chávez (1996), aplica la sustracción del objeto oscuro para el efecto de bruma e incorpora una estimación de la transmitancia ya que esta representa la absorción por parte de los gases atmosféricos y de la dispersión Rayleigh.

Este modelo asume que la irradiancia espectral difusa del cielo es 0.0 y que el camino de radiación debido a la bruma es igual al ND o brillo de cada banda, sin embargo la transmitancia (T) es calculada con el coseno del ángulo cenital del sol ($90 - \text{elevación solar}$). Los datos que se requieren para este método son: i) fecha y hora de adquisición de la imagen; ii) el ángulo solar y del satélite; iii) los valores de ganancia y sesgo; y iv) la longitud de onda media de la banda a corregir. Los valores de ganancias y sesgo son incorporados en las unidades $\text{mW cm}^{-2}\text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ (milliWatts

por centímetro cuadrado por estereoradian y por micrón).

Una vez homogenizados los mosaicos de las imágenes, se procedió a recortar el área de estudio con base a los parámetros espaciales de la cartografía de coberturas y usos de suelo desarrollada por Alatorre *et al.* (2011)

Construcción de la serie temporal NDVI

Para realizar el análisis de la evolución temporal de la actividad vegetal en el área de estudio, como una función estacional de la actividad vegetal, y para evaluar con mayor firmeza los patrones temporales y espaciales de la actividad vegetal en áreas de manglar, se utilizó el NDVI.

Las series temporales del NDVI se obtuvieron a partir de las imágenes Landsat 7 ETM+, con el objetivo de monitorear la actividad vegetal. El NDVI fue calculado como lo sugiere Rouse *et al.* (1974):

$$NDVI = (\rho_{IR} - \rho_R) / (\rho_{IR} + \rho_R)$$

Donde ρ_{IR} es la reflectividad en la región del infrarrojo cercano del espectro electromagnético y ρ_R es la reflectividad en la región del rojo. El NDVI es una medida de la capacidad fotosintética de las plantas (Ruimy *et al.*, 1994) y la resistencia estomática con respecto a la transferencia de vapor de agua (Tucker y Sellers, 1986). De manera que los valores más altos de NDVI indican mayor actividad de la vegetación.

Construcción de las series temporales de las variables climáticas

Para determinar la presencia de un efecto de las variables climatológicas sobre las tendencias temporales de la actividad vegetal, se utilizó una base de datos del Centro Meteorológico Nacional de México (CONAGUA, 2014) que contiene datos de precipitación acumulada desde el año 1990 al 2010. Se seleccionaron las estaciones meteorológicas de Guaymas, Los Mochis y Navojoa (Figura 3).

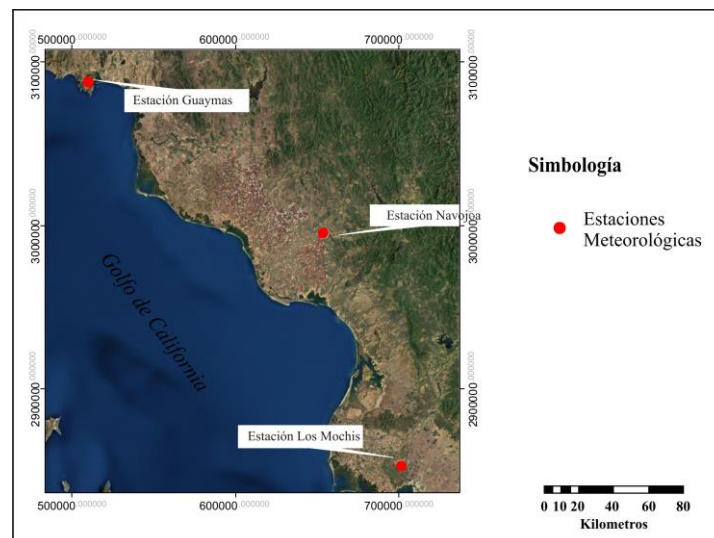


Figura 3. Localización de las estaciones meteorológicas.

Las series temporales de las precipitaciones totales y las temperaturas máximas/mínimas medias se calcularon a partir de la serie diaria original, sumando los valores diarios durante el periodo inmediatamente anterior a las fechas de cada imagen. Así, las series climáticas se calcularon para los siguientes periodos previos a la fecha de la imagen: 30 días, 60 días, 90 días, otoño, invierno, verano, otoño + invierno, otoño + invierno + verano.

Análisis estadístico

Las series temporales de NDVI para cada una de las coberturas de suelo fueron verificadas para determinar la presencia de tendencias temporales, usando la prueba de correlación de Spearman contra el tiempo (Alatorre, 2010). Esto permitió el análisis de la dinámica vegetal en términos de incremento (correlación positiva) y un descenso de la actividad (correlación negativa). El grado de significancia de las tendencias fue verificada usando el valor de p asociado con el estadístico rho de Spearman.

La prueba de Spearman permite detectar la presencia de tendencias temporales en las series de NDVI, pero no identifica los factores implicados. Para determinar el control que ejerce el clima sobre la actividad vegetal y para aislarlo de otros factores, se realizó una regresión multivariante de los valores medios de NDVI contra las variables climáticas en cada una de las coberturas.

Como paso intermedio se llevó a cabo un análisis de la correlación para seleccionar la serie temporal climática más adecuada. Se encontró que las series temporales climáticas que tenían una mayor correlación con el NDVI fueron: i) precipitación acumulada durante los 90 días previos; y, ii)

temperaturas máximas/mínimas medias registradas en los 30 días previos a la fecha de adquisición de cada imagen, las cuales fueron utilizadas como covariables en el análisis de regresión. También se introdujeron otras dos covariables, el día juliano y el año de adquisición de la imagen, ya que esto podría afectar el NDVI.

Para determinar las variables que explican significativamente la evolución temporal del NDVI sobre cada cobertura, se utilizó un procedimiento de retroceso “stepwise” basado en AIC (Akaike’s information criterion statistic), implementado en software estadístico R (R Development Core Team, 2008).

Análisis espacialmente distribuido de las tendencias del NDVI

Para realizar un análisis espacial, la regresión multivariante fue repetida píxel a píxel para toda la región. Esto permitió obtener un mapa espacialmente distribuido de las tendencias del NDVI que no fueron explicadas por las variables climáticas, y así identificar las áreas que experimentan procesos de degradación o recuperación vegetal. Para esto se aplicó el análisis Mann Kendall en el software IDRISI (Versión Selva).

El test Mann-Kendal ha demostrado ser apropiado (Alcaraz-Segura *et al.*, 2010) para analizar series auto correlacionadas con tendencias monótonas independientes del tipo de función de la tendencia (e.g. lineal, cuadrática, etc.). Dicha prueba permite evaluar la dirección de las variaciones y si dicha variación es significativa.

El modulo Mann Kendall calcula la tendencia monótona en los datos recogidos a través del tiempo mediante una medida no paramétrica llamada Mann Kendall (Gibbons, 2003). La estadística Mann Kendall es la frecuencia relativa de aumentos menos la frecuencia relativa de disminuciones, todas las combinaciones de pares de valores a través del tiempo son evaluadas en cada pixel y se realiza tomando en cuenta los números que están aumentando o disminuyendo con el tiempo; en esta estadística la serie de tiempo es la variable dependiente y el tiempo es la variable independiente (Santana *et al.*, 2013).

Análisis de la distribución espacial de granjas camaronícolas y su relación con los procesos de degradación de la cubierta vegetal

Para poder hacer un análisis de la relación espacial que podrían ejercer la presencia o ausencia de granjas camaronícolas con los procesos de degradación o recuperación de la vegetación, fue necesario realizar una cartografía con la ubicación de las granjas camaronícolas en el área de estudio, la cual se realizó mediante fotointerpretación.

RESULTADOS

Serie temporal del NDVI y variables climatológicas

La evolución temporal de los valores medios de NDVI para cada una de las coberturas y usos de suelo fue evaluada (Figura 4). Cabe destacar que visualmente es evidente la superioridad de valores medios de NDVI en la categoría de manglar, ya que son zonas con mayor vegetación y va disminuyendo

progresivamente conforme se encuentran unidades con menos cobertura vegetal.

Se observa la evolución temporal de las variables climatológicas: precipitación (90 días), temperatura máxima/mínima (30 días). La precipitación acumulada, muestra una aparente tendencia negativa en el periodo de estudio. Sin embargo, se observa una fuerte oscilación en los datos de precipitación acumulada, por ejemplo en los años 1991 y 1992 se registraron los valores más altos, superando los 168 mm, en cambio en los años 2006 y 2009 no se registraron lluvias.

La serie temporal de temperatura máxima/mínima presentó grandes oscilaciones durante el periodo de estudio y no se puede observar ninguna tendencia. Sin embargo, si se puede observar que en los primeros años el umbral entre las temperaturas máxima/mínima era más estrecho que al final del periodo, donde se ve que las líneas se separan.

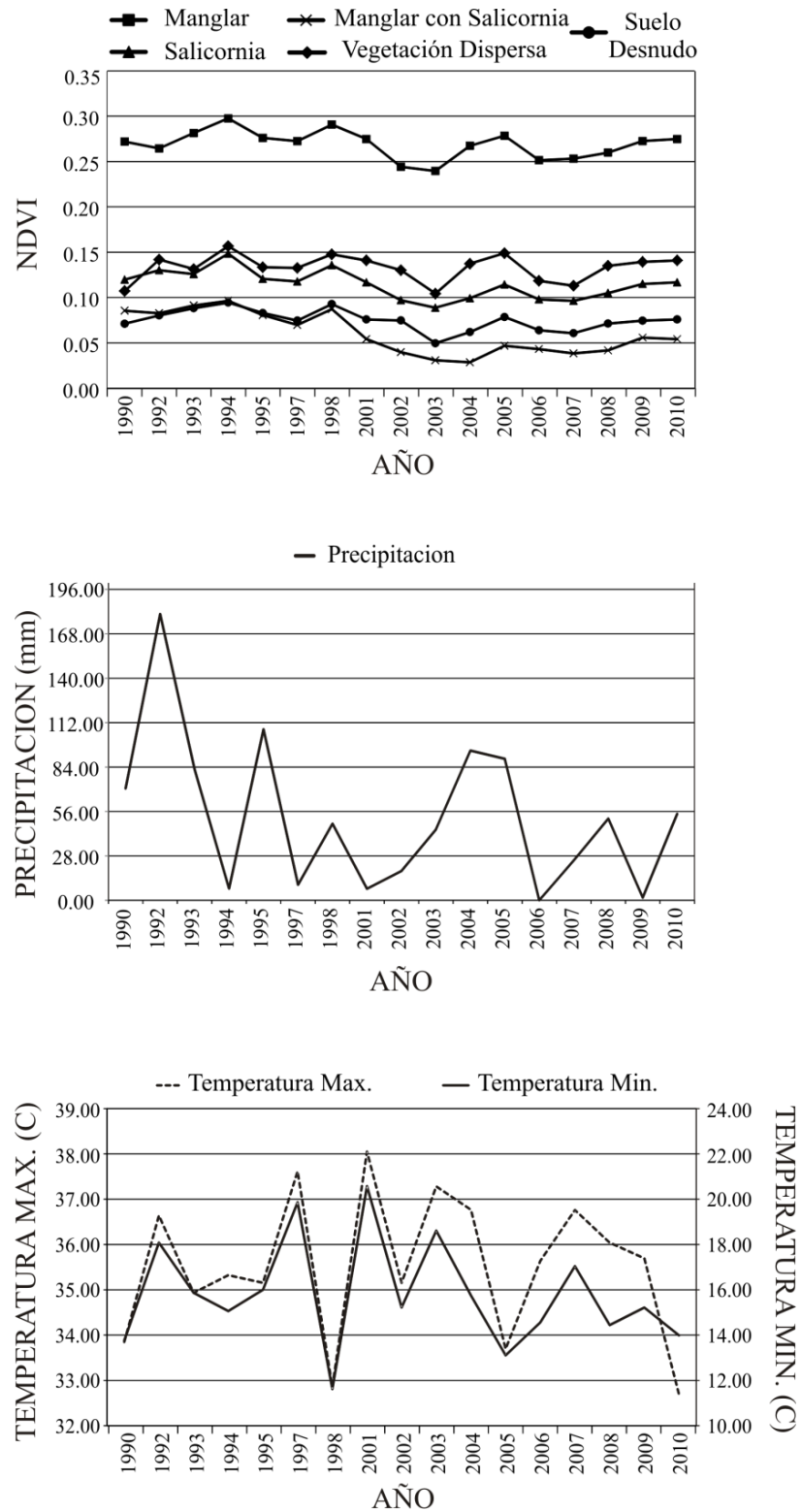


Figura 4. Evolución temporal de los valores medios de NDVI en cada una de las categorías de cobertura y uso de suelo presentes en el área de estudio y la evolución temporal de las variables climáticas.

Análisis de la regresión del NDVI contra las variables climáticas

El análisis de la regresión permitió explicar los patrones temporales del NDVI observados sobre cada cobertura de suelo. El modelo de regresión en general se ajustó bien a los valores de NDVI observados, solo en el caso de la vegetación dispersa, los resultados del

modelo estuvieron ligeramente por debajo del nivel de confianza ($p=0.93$) (Tabla 3). El mejor ajuste se obtuvo para la cobertura de Salicornia, como lo demuestra el valor de R^2 y p . En todos los modelos no fue identificada ninguna variable climática que explique la evolución temporal de la actividad vegetal (Coeficientes Beta).

Tabla 3. Análisis de la regresión multivariante para los valores medios observados del NDVI para cada una de las coberturas y uso de suelo del área de estudio y su relación con variables climatológicas.

	Manglar	Manglar con Salicornia	Salicornia	Vegetación Dispersa	Suelo Desnudo
R^2	0.74	0.82	0.98	0.71	0.89
Valor- p	<0.05*	<0.01*	<0.05*	0.93	<0.05*
Error Residual Estándar	0.021	0.018	0.026	0.023	0.028
Coeficientes Beta:					
Precipitación	—	—	—	—	—
T max	—	—	—	—	—
T min	—	—	—	—	—
Día Juliano	—	—	—	—	—
Tiempo (Año)	-0.3965	-0.8042	-0.6116	—	-0.4923
Tendencia Temporal (Cambio en NDVI)					
Por Año	-0.0011	-0.0034	-0.0018	<0.0001	-0.0010
Periodo 1990-2010	-2.22%	-6.80%	-3.60%	0.00%	-2.00%

Sin embargo la variable tiempo (año) si mostro una relación negativa estadísticamente significativa para todas las cubiertas, excepto para la categoría de vegetación dispersa, es decir, conforme va aumentando el tiempo los valores medios de NDVI van disminuyendo. Contrariamente a lo que se esperaba, de acuerdo a los valores del Coeficiente Beta, la categoría que mejor fue explicada por la variable tiempo es manglar con salicornia (-0.8042), lo cual se tradujo en una tendencia anual negativa para todo el periodo de estudio

de -6.80%. Probablemente la causa de que los valores medios de NDVI hayan disminuido significativamente para la categoría de manglar con salicornia, se debe a que esta cubierta se localiza en una zona de transición entre la cobertura de manglar y la cobertura salicornia, lo cual hace suponer que en el pasado estas zonas estaban con una mayor cobertura de manglar, la cual se ha degradado hasta convertirse en una zona de transición. La cobertura de manglar también ha tenido tendencia negativa, entorno al -2.22 %, y la

de salicornia en un -3.60 %, lo cual también es significativo en términos de las condiciones de degradación de las cubiertas de estas categorías.

Análisis espacialmente distribuido de las tendencias del NDVI

Se realizó el análisis Mann Kendall para una mejor discretización espacial de las tendencias estadísticamente significativas ($p=0.05$) en el área de estudio. En la Figura 5 se puede observar que la mayor parte del área de estudio, presenta

áreas que no tienen tendencia positiva ni negativa, las cuales son consideradas como estables. Sin embargo, es de destacar la presencia de grandes extensiones homogéneas que tienen tendencias negativas (degradación), las cuales se distribuyen espacialmente de forma muy consistente a lo largo del área de estudio, principalmente en las zonas de manglar y manglar con salicornia, en cambio las tendencias de ganancia solo se encuentran en pixeles aislados (recuperación).

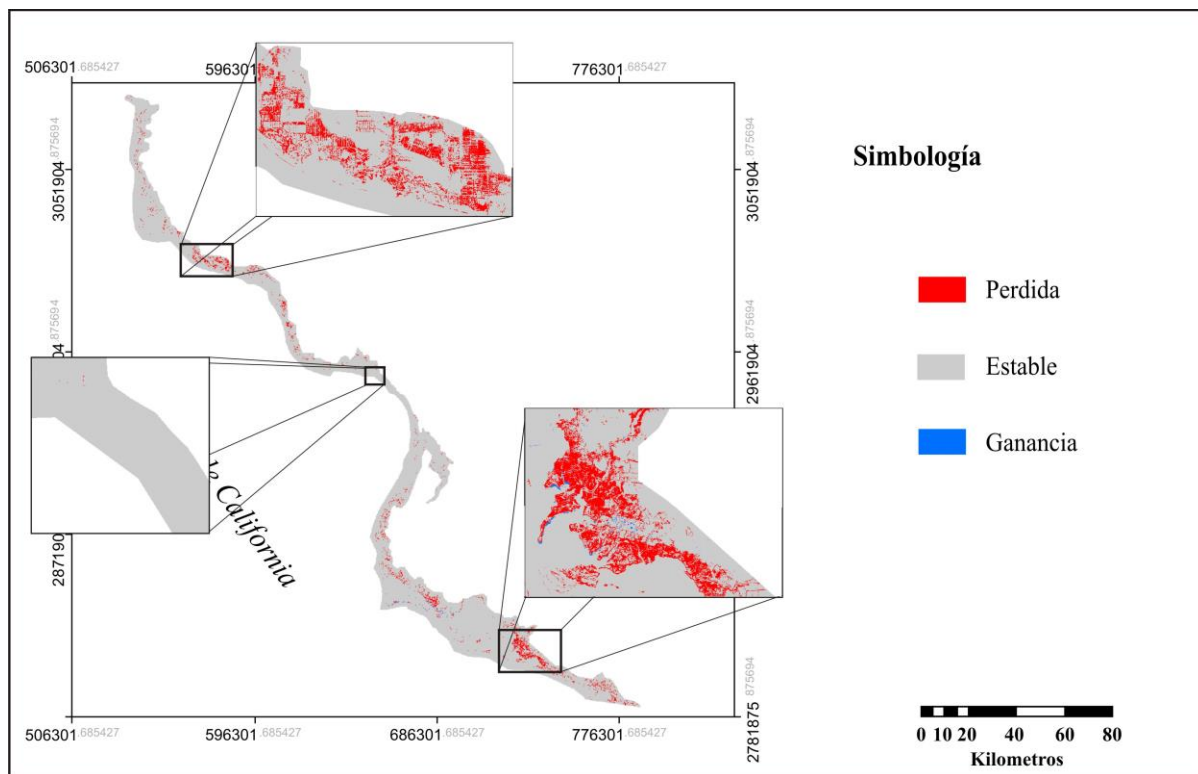


Figura 5. Discretización espacial de las tendencias temporales estadísticamente significativas ($p=0.05$) del NDVI por medio de Mann Kendall.

El análisis espacialmente distribuido de las tendencias temporales del NDVI presentes en cada cobertura y uso de suelo (Figura 6), arrojó que la mayor parte de la superficie ocupada por cada una de las categorías ha permanecido sin tendencia, es decir en condiciones estables. Sin embargo, la superficie con procesos de degradación en las categorías de manglar y manglar con

salicornia son de tener en cuenta. La categoría de manglar con salicornia presentó el mayor porcentaje de pérdida, equivalente a un 42.13% del área total de esta categoría, en segundo lugar aparece la categoría de manglar con un 30.61% de superficie con procesos de degradación a lo largo del periodo 1990 – 2010.

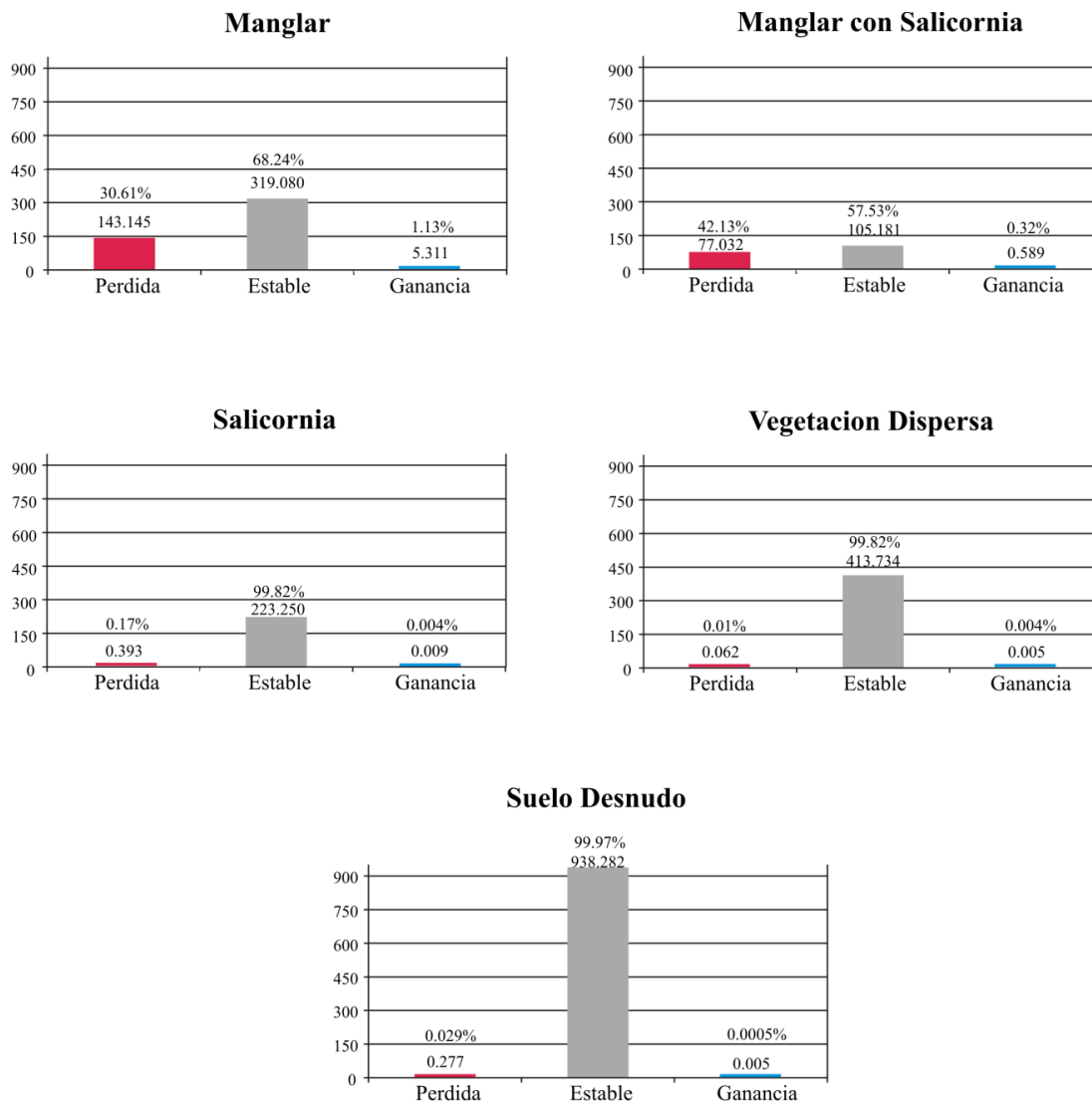


Figura 6. Análisis de la frecuencia de las tendencias temporales del NDVI en cada una de las categorías en km².

Análisis de la distribución espacial de granjas camaronícolas y su relación con los procesos de recuperación y degradación de la cubierta vegetal

Para establecer si existe relación entre las tendencias negativas de los valores medios del NDVI y la localización de las granjas camaronícolas, se digitalizaron las granjas en el área de estudio por medio de fotointerpretación (Figura 7). La distribución espacial de las granjas camaronícolas demuestra que la mayor proliferación se concentra en la zona norte y sur del área de

estudio. Estas zonas coinciden con las áreas de pérdida de actividad vegetal (Figura 6 y 7). Esto hace evidente que la presencia de granjas camaronícolas ha contribuido de una forma muy importante en los procesos de degradación de la cubierta de manglar en el área de estudio. Enfocando las áreas que no cuentan con presencia de granjas camaronícolas, parte central del área de estudio, la actividad vegetal en esta misma zona ha permanecido estable en su mayor parte, incluso con algunos píxeles aislados de recuperación.

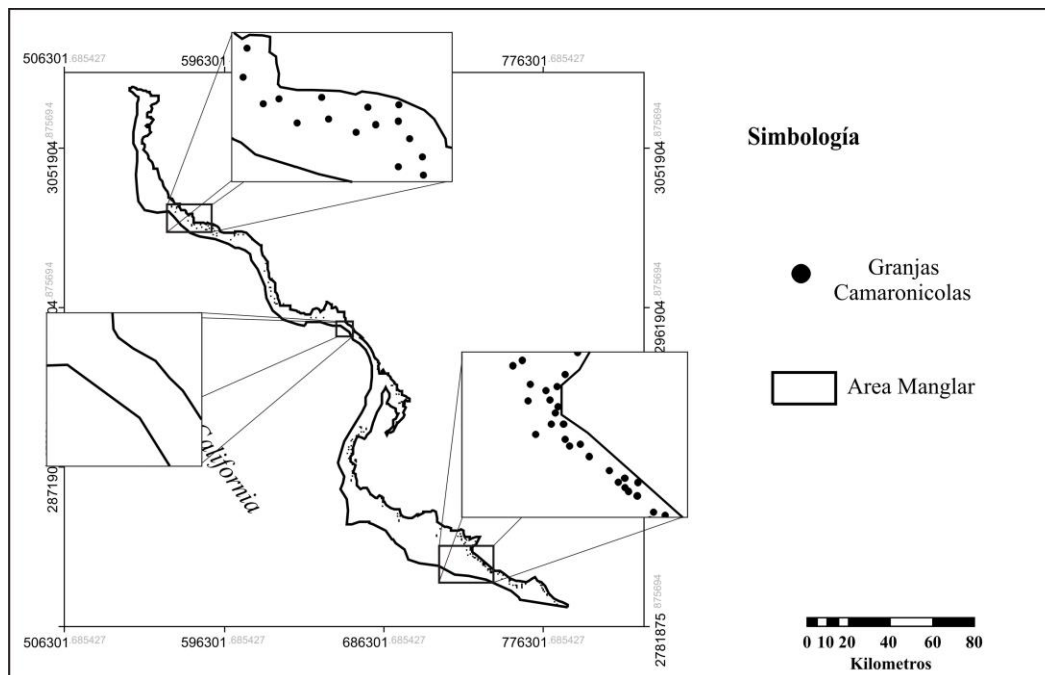


Figura 8. Distribución espacial de los las granjas camaronícolas presentes en el área de estudio.

Con base a estos resultados y tratando de encontrar una explicación a los procesos de degradación vegetal en las zonas de manglar, el estudio realizado por Licon et al. (2004) demostró que la inserción de granjas camaronícolas está estrechamente relacionada

con la remoción directa de grandes extensiones de manglar, sin considerar la preservación de ecosistemas relictos o corredores ecológicos que aseguraran la funcionalidad del paisaje y la conectividad entre: i) ambientes continentales, ii) costeros,

y iii) marinos. Otro aspecto es lo que se denomina la bordería de las granjas, la cual modifica las micro-cuencas locales, interrumpiendo los flujos de nutrientes y agua dulce para los ciclos biogeoquímicos y demás funciones ambientales del estero (Licon, et al, 2004).

Cabe destacar que el 94% de las granjas camaronícolas de México están situadas en la región del Golfo de California, concentradas en los estados de Sonora, de Sinaloa, y de Nayarit con apenas unas pocas situadas en la Baja Península. Esta región concentra el 95%

de toda la producción de la acuicultura del camarón en México (SAGARPA, 2009). En la región del Golfo de California, la acuicultura del camarón se ha estado ampliando rápidamente. El número de productores prácticamente se duplicó, llegando a casi 400 granjas en el período entre 1993 y 1998; para el 2003 existían casi 20.000 hectáreas de estanques (SAGARPA, 2009). Es por esto, que se puede establecer una fuerte relación en el periodo de tiempo evaluado en este estudio y la expansión de las granjas camaronícolas ya que el área de estudio comprende los Deltas de los ríos Yaqui y Mayo en Sonora, y Río Fuerte en Sinaloa, abarcando una gran parte de la región más productiva del país. Los resultados indican una pérdida significativa de actividad vegetal en zonas de manglar durante este periodo y que además coincide con el auge de implementación de las granjas camaronícolas y con su distribución espacial, es decir, las zonas que concentran las mayores áreas con pérdidas significativas de la actividad vegetal, que se traducen en degradación vegetal, coinciden con la

ubicación de las granjas que actualmente operan en la región.

CONCLUSIONES

La cobertura de manglar localizada en Deltas de los ríos Yaqui y Mayo en Sonora, y Río Fuerte en Sinaloa, México, ha presentado una pérdida significativa de la actividad vegetal en un periodo de 20 años (1990-2010) estudiado a través de técnicas de SR y SIG. Las zonas de manglar y manglar con salicornia han sufrido grandes pérdidas de actividad vegetal comparadas con las coberturas salicornia, vegetación dispersa y suelo desnudo, ya que estas áreas han permanecido sin cambios significativos, manteniendo más del 99% de su cobertura estable.

Los valores medios de NDVI para las categorías manglar y manglar con salicornia han presentado un descenso que se ha acentuado principalmente entre los años 1999 al 2003, de los 20 años de estudio, de este modo, se demostró mediante el análisis de regresión multivariante que efectivamente existen tendencias negativas para estas categorías, indicando una disminución importante de la actividad vegetal.

La tendencia negativa para manglar, manglar con salicornia, salicornia y suelo desnudo, no se vio explicada por ninguna variable climatológica (precipitación, temperatura máxima/mínima), sin embargo, la variable tiempo (año de adquisición de la imagen) demostró tener un fuerte peso sobre las tendencias negativas encontradas. La categoría manglar con salicornia presentó el

descenso más significativo en comparación con las demás categorías.

El análisis estadístico Mann Kendall espacialmente distribuido píxel a píxel para las series de tiempo de NDVI más la cartografía de coberturas y uso de suelo usada en este estudio, permitió el análisis de la dinámica vegetal en términos de tendencia positiva (recuperación) y tendencia negativa de la actividad vegetal (degradación), y se pudo determinar la relación espacial de estas tendencias con la presencia de granjas camaronícolas. En general se encontró que la categoría manglar con salicornia es la que presenta una mayor cobertura de procesos de degradación, asociados principalmente a que esta categoría es una zona de transición entre lo que actualmente es manglar con salicornia, lo cual hace pensar que en el pasado tenía una mayor cobertura de manglar, la cual se ha ido perdiendo por los procesos antropogénicos presentes en el área de estudio, como: i) remoción directa del manglar; ii) incremento en la salinidad del agua por descargas de las granjas en los canales intermareales de las zonas costeras, iii) interrupción de los afluentes de agua marina a las cabeceras de las zonas de mangle, iv) proceso de sucesión ecológica que implica la sustitución de la especie más estenohalina por especies con mayor tolerancia a altas concentraciones de salinidad. Ahora bien, a pesar de que en 2003 SEMARNAT decretó la Norma Oficial Mexicana NOM-022 que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros, suponiendo que la mayoría de las granjas camaronícolas han cumplido cabalmente esta norma, los resultados demuestran que a pesar

de esto en el área de estudio persiste un decremento de la actividad vegetal, es decir, el deterioro de las zonas de manglar ha sido tan severo que la tendencia negativa hasta 2010 no se ha revertido. En relación a esto, al hacer la comparación de las zonas donde se tiene presencia de granjas camaronícolas y las áreas de degradación, se encontró una relación muy estrecha, lo cual pone en relieve el efecto causado por esta actividad económica en la región, por lo que es de suma importancia estudiar más a fondo estos ecosistemas, para poder establecer normas y criterios que ayuden a mitigar su deterioro.

REFERENCIAS

- Acosta, V.J, Díaz JR, Rodríguez MT, Cerdeira S, Troche C, Cruz I, Ressler, Jiménez R. (2010), Aplicaciones de Percepción Remota en el Inventario y Monitoreo de Ecosistemas Costeros en México. XIV International SELPER Symposium, Guanajuato, México. ISBN 978-607-441-100-3.
- Alatorre, LC., Beguería S. & Vicente-Serrano, SM., (2010), *Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo Central*. Pirineos, 165: 7-27.
- Alatorre L.C. Sánchez-Andrés R., Cirujano S., Beguería S., Sánchez-Carrillo S., (2011), Identification of Mangrove Areas by Remote Sensing: The ROC Curve Technique Applied to the Northwestern Mexico Coastal Zone Using Landsat Imagery. Remote Sensing 3: 1568-1583
- Alcaraz-Segura, D., Liras, E., Tabik, S., Paruelo, J., & Cabello, J., (2010),

- Evaluating the Consistency of the 1982- 1999 NDVI Trends in the Iberian Peninsula across Four Time-series Derived from the AVHRR Sensor: LTDR, GIMMS, FASIR, and PAL-II. *Sensors*, 10: 1291-1314; doi.10.3390/s100201291.
- Alcaraz-Segura, D., Baldi, G., Durante, P., Garbulsky, M.F., (2008), Análisis de la dinámica temporal del NDVI en áreas protegidas: tres casos de estudio a distintas escalas espaciales, temporales y de gestión. *Ecosistemas* 17(3):108-117.
- Alday, V. (1999), *Diagnóstico y prevención de la enfermedad del Punto Blanco*. El Mundo Acuícola. 5:3-7
- Berlanga , C.A. & Ruiz, L., (2007), Análisis de las tendencias de cambio del bosque de mangle del sistema lagunar Teacapán-Agua Brava, México. Una aproximación con el uso de imágenes de satélite Landsat. *Universidad y Ciencia*, 23: 29-46.
- Chavez, P.S. Jr., (1996), Image-based atmospheric corrections—revisited and revised. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 62(9): 1025-1036
- Chuvieco, E., (1996), *Fundamentos de teledetección*. 3ª edición revisada ed. Ediciones RIALP, Madrid.
- CONAGUA (2014), Consultado en: [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=28]
- Day, J. W., Hall, C. A. S., Kemp, W. M. & Yañez-Arancibia, A. (1989), *Estuarine Ecology*. John Wiley & Sons, Inc., (eds). New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- De la Fuente, G., Carrera, E. (2005), *Cambio de Uso del Suelo en la zona costera del Estado de Sinaloa*. Dumac. Ducks Unlimited de Mexico, A.C.
- Eastman, R., (2004), *IDRISI Kilimanjaro, Guia para SIG y Procesamiento de Imágenes Clark Labs Clark University*, Worcester, MA, USA.
- FAO (2009), *Sistemas de información geográfica, sensores remotos y mapeo para el desarrollo y la gestión de la acuicultura marina*. Servicio de Gestión y Conservación de la Acuicultura Departamento de Pesca y Acuicultura FAO. ISBN 978-92-5-105646-2
- FAO (2003), *Status and trends in mangrove area extent worldwide*. In: Wilkie ML, Fortuna S, editors. *Forest resources assessment*. Working Paper No. 63. Forest Resources Division. Rome:[www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/007/j1533e/J1533E109.htm].
- Gibbons, J.D. and Chakroborty, S., (2003), *Nonparametric Statistical Inference*. Marcel Dekkar, Inc., New York.
- Henderson, F.M., Hart, Jr., Heaton, B.P., Portolese, E., (1999), *Mapping coastal ecosystems over a steep development gradient using C-CAP protocols*. *International Journal of Remote Sensing* 20(10): 727-744.
- Licon, H., Cruz, A., Bravo, L., Anaya, I., Mendoza, M., Ortiz, L., Estrada, C., Obregon, V., Flores, E., (2004), *Estudio de factibilidad técnica, económico, financiero, proyecto ejecutivo y estudio de impacto*

- ambiental, para la construcción de la esollera, canales de llamada y drene de descarga en el Parque Camaronícola “Los Melagos”. Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la UNISON.
- Monteith, J.L., (1981), Climatic variation and the growth of crops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107:749-774.
- Muttitanon, W., Tripathi, N.K., (2005), Land use/land cover changes in the coastal zone of Ban Don Bay, Thailand using Landsat 5 TM data. *International Journal of Remote Sensing* 26(11): 2311-2323.
- Paruelo, J.M., (2008), La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Ecosistemas* 17(3):4-22.
- Paruelo, J.M., Epstein, H.E., Lauenroth, W.K., Burke, I.C., (1997), ANPP estimates from NDVI for the Central Grassland Region of the United States. *Ecology* 78:953-958.
- R Development Core Team (2008), R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. & Harlan, J.C. (1974), *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation*. NASA/GSFC type III final report, Greenbelt, M.D.
- Ruimy, A., Sangier, B. & Dediu, G. (1994), *Methodology for the estimation of terrestrial primary production from remotely sensed data*. *Journal of Geophysical Research*, 99(D3): 5263-5283.
- SAGARPA, (2009), Estudio de la infraestructura logística para la exportación del camarón blanco a algunas ciudades de Estados Unidos y Canadá.
- Santana, M.V., Rosales, E.M., Manzano, L.R., Santana, G., & Bonfilio, N., (2013), Las Geotecnologías en la construcción de ciudades Saludables: Zona Metropolitana de Toluca, México. Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Geografía.
- Tobey, J., Clay, J, Vergne, P. (1998), *Manteniendo un Balance: Impactos Económicos, Ambientales y Sociales del Cultivo de Camarón en Latinoamérica*. Reporte de Manejo Costero No 2202. Proyecto de Manejo Costero II. USAID – Centro de Recursos Costeros de la Universidad de Rhode Island. FAO, 68.
- Tucker, C.J. & Sellers, P. (1986), *Satellite remote Sensing of primary production*. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1395-1416.
- Tucker, C.J., Townshend, J.R., Goff, T.E., (1985), African land-cover classification using satellite data. *Science* 227:369-375.
- Valenzuela, M.A., Suárez, J., Sánchez, A., Rosas, C. (2002), *Cultivo de camarón blanco (Litopenaeus setiferus) en estanques de manto freático*. Laboratorio de Ecología y Biología Marina Experimental, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional

Autónoma de México.
[http://www.sisal.unam.mx/data/files/86_manto-freatico.pdf: 08 de octubre de 2013]

Virginia, R.A., Wall, D.H., (2001), Principles of Ecosystem function. En: Levin, S.A. (ed.) Encyclopedia of Biodiversity, pp. 345-352. Academic Press, San Diego, USA.