

**MONITOREO DE UNA FORMACIÓN DELTAICA
RECIENTE EN UN HUMEDAL COSTERO TROPICAL
UTILIZANDO IMÁGENES AEROSPAZIALES Y SIG.
CASO DELTA DEL RÍO GUAPO, LAGUNA DE
TACARIGUA, VENEZUELA**

*Argelia Calzadilla Pérez**

Resumen:

Un enfoque integrado del uso de imágenes aeroespaciales y SIG fue aplicado en el ‘monitoreo’ de un proceso acelerado de formación deltáica en la Laguna de Tacarigua, un humedal costero de manglar localizado en la costa nor-central de Venezuela. Recientemente, el reconocimiento del valor como recurso económico de humedales costeros tales como lagunas costeras y deltas, ha traído como consecuencia la necesidad de proteger y conservar estos ecosistemas. Con ese fin, estas áreas costeras deben ser continuamente “monitoreadas” de tal manera que los cambios temporales en su ambiente puedan ser analizados. Determinar la causa, extensión y distribución espacial de estos cambios, podría contribuir en etapas posteriores en muchos aspectos de la calidad ambiental, análisis de compatibilidad y conflictos del uso de la tierra, y, en general, en el diseño de planes para un manejo más racional de los recursos. Mediante el uso integrado de información aeroespacial y un levantamiento de campo, se estudió la formación del delta del río Guapo dentro de la Laguna de Tacarigua y se ‘mapeó’ la expansión

* Geógrafo Instituto de Geografía y Desarrollo Regional, Universidad Central de Venezuela.

que este ambiente deposicional ha venido sufriendo. Un set histórico de fotografías aéreas y una imagen de radar, conjuntamente con el chequeo de campo, sirvieron de base para evaluar el crecimiento del delta desde su formación, hasta el presente.

Palabras claves:

Imágenes aeroespaciales, detección de cambios, lagunas costeras tropicales, humedales costeros, deltas, SIG aplicado a zonas costeras.

Abstract:

The integrated use of remote sensing data and GIS to monitor a rapid recent delta formation was undertaken in the Tacarigua Lagoon, a mangrove coastal protected wetland in the north-central coast of Venezuela. Recently, the resource value of coastal wetlands such as coastal lagoons and deltas, has brought about a need to protect and conserve these ecosystems. To that end, valuable resources such as these should be continuously monitored so that temporal changes in their environment can be analysed. The importance of determining the cause, extent, and spatial distribution of these changes can then be used in different aspects of environmental studies, land suitability analyses and for wise resource management. Aerospace data interpretation and a field survey were utilised to study the formation of the Guapo River delta within the Tacarigua Lagoon and to map the expansion that this depositional environment has undergone. A historical set of aerial photographs and a radar image, together with a GIS, were used to assess the growth of the delta from the beginning of its formation up to the present time.

Key words:

Aerospace images, change detection, tropical coastal lagoons, coastal wetlands, deltas, GIS applied to coastal zones monitoring.

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas tres décadas, se ha realizado un esfuerzo significativo para reconocer los humedales como ecosistemas extremadamente importantes para la conservación de la biodiversidad en general y para el bienestar de los asentamientos humanos en particular. Los humedales representan áreas donde el agua es el factor primordial en el control del ecosistema y sus poblaciones animales y vegetales asociadas. Ocurren donde el nivel de la capa freática está a nivel de superficie (o muy cerca de ella) o, donde el terreno está cubierto por aguas someras (IUCN, 1999). El texto de la Convención de Ramsar (1971), define los humedales como:

“Extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (IUCN, 1999).

A diferencia de algunos otros ecosistemas, que se encuentran únicamente en determinadas áreas, los humedales están prácticamente en todas partes. Los hay en cada país, desde la tundra hasta los trópicos. El World Conservation Monitoring Centre (WCMC) ha estimado que cerca de 570 millones de hectáreas (5,7 millones de km²), aproximadamente un 6% de la superficie de la tierra, está ocupada actualmente por humedales (IUCN, 1999; Lyon & Mc Carthy, 1995).

Los humedales figuran entre los ecosistemas más productivos del mundo, entre otras razones, porque actúan como viveros naturales para una gran diversidad de especies biológicas. Como recurso económico, proveen beneficios significativos: suministro

de agua, pesca (unos 2/3 de la pesca mundial está ligada a humedales continentales y marinos), agricultura, producción maderera, recursos energéticos, vida silvestre, transporte, recreación y oportunidades turísticas (UICN, 1999).

El tema de los humedales, es en la actualidad, de gran interés mundial, especialmente luego del establecimiento de la Convención Ramsar sobre Humedales en 1971, un tratado internacional que proporciona el marco para la acción nacional y la cooperación internacional en la conservación y uso racional de los humedales y sus recursos (UICN, 1999).

Recientemente, el reconocimiento del valor de los recursos existentes, particularmente en **humedales costeros** tales como lagunas costeras y deltas, ha traído como consecuencia una necesidad creciente de proteger y conservar estos ecosistemas (Lyon & Mc Carthy, 1995). Desafortunadamente, y pese al progreso logrado en años recientes, los humedales costeros son además, uno de los ecosistemas más intervenidos del mundo, debido principalmente a acciones como conversión de drenajes, contaminación, sobre-explotación de los recursos y políticas de uso de la tierra mal implementadas. Esto podría ser crítico, si se considera que existe un nexo muy estrecho entre los factores físicos, biológicos y químicos en el funcionamiento de las lagunas costeras, por lo que cualquier alteración en alguno de sus elementos, puede tener repercusión en todo el sistema (UICN, 1999; Viles & Spencer, 1995).

Es por ello que recursos tan valiosos y efímeros como estos deben ser continuamente 'monitoreados', de tal forma que los cambios temporales en sus ambientes puedan ser analizados. La importancia de determinar la causa, extensión y distribución espacial de estos cambios radica en que posteriormente estos análisis pueden

ser utilizados en diferentes aspectos de los estudios ambientales, aptitud de uso de la tierra y manejo racional de los recursos (Viles & Spencer, 1995).

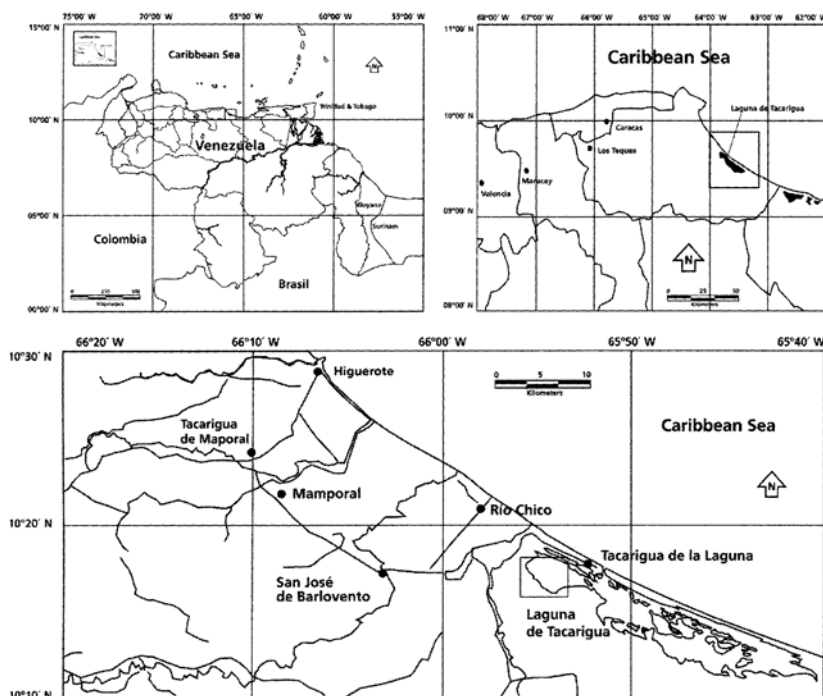
A la luz de estas consideraciones, la presente investigación pretende contribuir al estudio del problema de la sedimentación en el Parque Nacional Laguna de Tacarigua, uno de los puntos más críticos que ha afectado a este humedal costero de manglar en la costa nor-central de Venezuela, el cual sufre las consecuencias de una intervención no planificada.

2. EL HUMEDAL COSTERO LAGUNA DE TACARIGUA

La Laguna de Tacarigua se localiza en la costa nor-central de Venezuela (Norte de Sur América), en el Estado Miranda, adyacente al poblado de Tacarigua de la Laguna y a unos 150 km al Este de Caracas. El área se enmarca entre las coordenadas de latitud Norte $10^{\circ}13' - 10^{\circ}21'$ y de longitud Oeste $65^{\circ}57' - 65^{\circ}40'$, representando un complejo sedimentario costero de 30 km de longitud y 5 km de ancho máximo (Figura 1). La laguna, con un área total de 9.200 ha, de tipo estuarino y aguas someras permanentes, está separada del Mar Caribe por una serie de barras arenosas y se conecta con éste por medio de una pequeña boca estacional. Se encuentra rodeada de manglares y recibe agua dulce a través de numerosos ríos, quebradas y caños, entre los cuales el río Guapo es el más importante.

Figura 1

**Localización geográfica del humedal costero de Tacarigua
(tomado de la base de datos cartográfica del IGDR)**

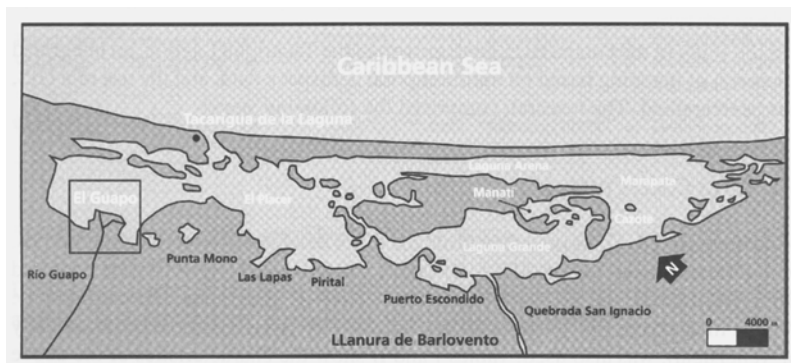


La Laguna de Tacarigua fue declarada Parque Nacional en 1974 debido a sus excepcionales valores biológicos (algunos de ellos amenazados) paisajísticos y económicos, dado que la pesca de subsistencia ha sido, tradicionalmente, la actividad económica más importante para la población local. Por otra parte, la laguna también fue incluida en la Lista Ramsar de Humedales de Importancia Internacional (Sitio Ramsar) en 1996 (UICN, 1999).

El área específica de estudio es el delta del río Guapo (N 10° 17' 00" – 10° 18' 30" y W 65° 54' 00" – 65° 56' 30"), situado en el

borde sur-occidental de la laguna, en el sector conocido como El Guapo (Figura 2). Este pequeño delta, es un ambiente de deposición dentro de la dinámica del complejo sedimentario Laguna de Tacarigua, formado en las calmadas aguas estuarinas de la laguna luego del desvío del Río Guapo en 1964.

Figura 2
Ubicación del delta del río Guapo en la Laguna de Tacarigua
(Chacartegui *et al.*, 1998)



3. ANTECEDENTES

Pese a ser un área protegida, la Laguna de Tacarigua ha venido sufriendo un proceso acelerado de degradación ambiental antes y después de ser declarada Parque Nacional por diversas causas, vinculadas a problemas de contaminación, pesca ilegal, sedimentación acelerada, reducción de la profundidad de las aguas, desvíos de drenajes y turismo no controlado.

Una de las acciones que mayor impacto ha causado en la dinámica de la laguna ha sido el desvío del río Guapo, principal eje

de drenaje de la cuenca del mismo nombre. Este río, que no descargaba directamente en la laguna (al menos en épocas recientes), fue forzado a desembocar en ella por intermedio de un canal artificial (Madre Casañas), construido entre 1964 y 1965 con la finalidad de aliviar las inundaciones que frecuentemente causaba el río Guapo en su tramo bajo y suministrar agua dulce a la laguna que venía sufriendo un acelerado proceso de salinización en sus aguas. Sin embargo, la obra fue ejecutada de tal manera que la pendiente longitudinal del canal era mayor que la del lecho original del río Guapo. Este hecho degeneró en un incremento de la velocidad de flujo del canal, y consecuentemente, en la erosión de su propio lecho. El enorme volumen de sedimentos producto de la profunda socavación, fue transportado y depositado en el sector El Guapo de la laguna donde rápidamente se formó un delta (CTI, 1991).

El desvío del río Guapo y la consecuente formación y crecimiento de un delta en la laguna ha causado numerosos cambios ambientales en el sector El Guapo de la misma, tales como incremento en la carga sedimentaria y turbidez de las aguas, cambios en la salinidad del agua, disminución de la profundidad del agua, crecimiento acelerado del manglar, entre otros (Clement, 1980; Delgado, 1980; CTI/INPARQUES, 1991).

Tomando en cuenta su condición de humedal costero de importancia internacional, así como el valor de su recurso pesquero, se consideró relevante analizar desde el punto de vista cuantitativo y espacial, las fases de crecimiento del delta del río Guapo en la Laguna de Tacarigua, luego de la puesta en funcionamiento de la obra hidráulica antes mencionada. Con este fin, se llevó a cabo un estudio multitemporal, basado en la interpretación y uso integrado de una serie de imágenes aeroespaciales procesados en una plataforma SIG. Los resultados incluyen la actualización de la “data” disponible, así como la generación de mapas que contribuyan en el manejo ambiental y en la toma de decisiones relativas a este

humedal, por parte del Instituto Nacional de Parques de Venezuela (INPARQUES), partiendo de información de línea base más precisa y actualizada, un pre-requisito para cualquier acción de planificación.

4. ENFOQUE METODOLÓGICO

Para estudiar el crecimiento del delta del río Guapo en la Laguna de Tacarigua, se aplicó una metodología integrada de ‘mapeo’ basada en imágenes aeroespaciales multitemporales y el uso de un SIG. La investigación comprendió las siguientes fases:

4.1 Recopilación de la ‘data’

Fueron seleccionadas 9 fechas distintas de fotografías aéreas pancromáticas blanco y negro formato 23X23, a escalas variables, desde 1:15.000 hasta 1:60.000, adquiridas en el antiguo Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional de Venezuela (SAGECAN), hoy Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar (IGVSB). Además, se empleó una imagen de radar del año 1997 cedida por la empresa Petróleos de Venezuela (PDVSA). La descripción de las imágenes mencionadas se ofrece en las tablas 1 y 2.

Adicionalmente, se compiló otro tipo de información complementaria tales como: mapas topográficos y temáticos, informes acerca de la construcción del canal Madre Casañas y la formación y crecimiento del delta, las características ambientales del sector El Guapo de la laguna y estadísticas de algunos parámetros físicos y químicos de las aguas. La Tabla 3, resume la información cartográfica.

Tabla 1
Fotografías aéreas usadas en la investigación.

Año	Vuelo	Escala	Número de foto
1961	Proyecto 172	1:50.000.	813-A / 814-A
1963-1964	030356	1:25.000.	263/264
1967	030374	1:15.000.	257/256/055/054
1973	0303119	1:25.000.	281/282/283
1975	040193	1:25.000.	1031/1032
1979-1980	0303169	1:25.000.	261/262/263
1985	0303185	1:25.000.	076/077/078
1992	0303203	1:25.000	102/103/104
1994	0304585	1:60.000.	0001f-5/0002f-5 (rollo C)

Tabla 2
Imagen de radar usada para la investigación

Tipo de Data	Fecha	ID	Órbita	Beam Mode
RADARSAT	Marzo 12 1997	MO180627	7058 descending	SAR wide1 beam

Tabla 3
Mapas usados para la investigación

Tipo de Mapa	Área cubierta	Escala	Año	Fuente	Aplicaciones para la investigación
Topográfico	Cuenca de río Guapo, incluyendo la Laguna de Tacarigua	1:100.000	1974	SAGECAN	- Mapa de referencia y de localización. - Mapa Master para georeferenciar la imagen de radar.
Topográfico	Delta del río Guapo	1:5.000	1980	MINDUR	- Mapa de localización en el campo. - Mapa para georeferenciar las fotografías aéreas.
Topográfico	Laguna de Tacarigua	1: 25.000	1991	SAGECAN	- Mapa de ubicación en campo.
Vegetación	Laguna de Tacarigua	1: 25.000	1983	MARN	- Referencia para los tipos de vegetación en el área.
Profundidad del agua	Delta del río Guapo	-----	1998	Méndez (1995)	- Estudio del frente deltáico. - Batimetría

4.2 Preparación y conversión digital de la “data”

Durante esta fase, toda la data compilada fue procesada para hacer posible su posterior manejo y análisis en formato digital. Esta fase comprendió las siguientes actividades:

4.2.1 ‘Escaneo’ y georeferenciación de mapas topográficos

Los mapas topográficos 1:100.000 y 1:5.000 fueron ‘escaneados’ en un scanner digital con el fin de obtener imágenes raster que servirían como imágenes ‘master’ en el proceso posterior de georeferenciación. Este procedimiento se llevó a cabo utilizando

el software ILWIS 2.2. mediante la técnica de ‘tiepoints’ con un método de transformación ‘affine’ (van Westen & Farifteh, 1997).

4.2.2 ‘Escaneo’ y georeferenciación de fotografías aéreas

Las vistas aéreas fueron escaneadas en un scanner digital a alta resolución y luego georeferenciadas en ILWIS 2.2. utilizando la técnica de georeferencia “tiepoints” con un método de transformación proyectivo (projective). El método de transformación proyectivo es altamente recomendado para fotografías aéreas ‘escaneadas’ cuando no se dispone de un modelo digital de terreno (DTM). En el caso de esta investigación, no se contó con una serie de DTMs ya que únicamente existía información topográfica detallada para el año de 1980. Utilizar un modelo basado en esa única topografía (1980) para georeferenciar todas las restantes fotografías aéreas no sería razonable, dado que las condiciones topográficas del delta han variado considerablemente a lo largo del período de estudio. Por esta razón, no se crearon ortofotos y se empleó el mencionado método proyectivo, el cual se considera aceptable tomando en cuenta que se trata de un área prácticamente plana.

Todas las fotografías fueron georeferenciadas utilizando el mapa topográfico 1:5.000 del antiguo Ministerio de Desarrollo Urbano (MINDUR), hoy Ministerio de Infraestructura (MINFRA) como imagen ‘master’ y luego remuestreadas a una georeferencia común (corner georeference) de 5 m de tamaño de pixel, con la finalidad de obtener imágenes orientadas hacia el Norte y de resolución uniforme.

4.2.3 Georeferenciación y mejoramiento de la imagen de radar:

La imagen de Radarsat fue referenciada al mapa topográfico 1:100.000 igualmente en ILWIS 2.2., utilizando la técnica de ‘tiepoints’ pero con un método de transformación ‘affine’. Este método es recomendado para co-registrar imágenes de satélite en general. Posteriormente, se le aplicó una técnica de mejoramiento

sencilla, con el fin de acentuar los límites tierra-agua y permitir luego un mejor delineado de la superficie deltáica. Para ello se estrechó la imagen (image stretching) mediante una ecualización de histograma (histogram equalization).

4.2.4 Ampliación de fotografías aéreas: las vistas estaban disponibles a escalas distintas (algunas de ellas muy pequeñas), por lo cual para obtener un máximo de detalle que facilitara un delineado preciso de la superficie deltáica en cada fecha, se hicieron ampliaciones fotográficas de las vistas aéreas a una escala aproximada 1:12.500.

4.3 Interpretación de las imágenes aerospaciales

Una vez preparada y procesada la data, se procedió a su interpretación. El área del delta emergido fue delineada sobre las ampliaciones fotográficas de las vistas aéreas. Este procedimiento se hizo con ayuda de un estereoscopio de espejo con una superficie observable de 180 x 240 mm. En la imagen de radar estrechada, mostrando mejor contraste entre la tierra y el agua, la superficie del delta se delineó directamente digitalizándola por pantalla (on-screen digitasing).

4.4 Fase de Campo

El chequeo de campo tuvo lugar en Noviembre de 1999, durante la estación lluviosa. Comprendió un reconocimiento de las condiciones actuales del delta, incluyendo: 1) Unidades geomorfológicas actuales, 2) Actividad de los canales distributarios, 3) El avance de delta activo, 4) Colonización de la planicie por la vegetación, 5) El crecimiento del manglar en los bordes, 6) Las condiciones de profundidad, salinidad y turbidez de las aguas en el sector El Guapo y 7) El avance de la línea de costa actual. A tal fin, se tomaron muestras de suelos que posteriormente fueron analizadas in-situ. La línea de costa actual fue 'ruteada' en bote y levantada con un GPS. Estas observaciones acompañan el análisis de la evolución del delta.

4.5 Procesamiento final de la data

Las interpretaciones visuales de los límites del delta fueron digitalizadas como mapas de segmentos y seguidamente poligonizados (convertidos a mapas de polígonos o áreas) para permitir, posteriormente, ejecutar los distintos análisis dentro del SIG. Finalmente, a partir de estos mapas de polígonos (mapas del borde deltaico) se calcularon distintos parámetros numéricos (área total del delta, crecimiento total, tasa de crecimiento anual, % de crecimiento) para evaluar el crecimiento del delta durante el período 1961-1997. Esta secuencia multitemporal permitió realizar además un análisis visual de los patrones de crecimiento espacial del delta.

5. ‘MONITOREANDO’ EL CRECIMIENTO DE LA SUPERFICIE DELTAICA

El crecimiento del delta del río Guapo durante el período 1961-1997 fue evaluado a través del cálculo de indicadores tanto numéricos (área total del delta, crecimiento total, rata de crecimiento interanual, % de crecimiento) como espaciales (dirección del crecimiento) y tendencias.

5.1 Crecimiento total

Para el estudio del crecimiento total, la superficie del delta emergido fue delineada en cada una de las imágenes seleccionadas con la ayuda de un estereoscopio de espejo (excepto en el caso de la imagen de radar), generando así los llamados “Mapas del borde deltáico” para cada una de las fechas de adquisición (Figura 3). La información derivada de la interpretación visual fue posteriormente ingresada al computador digitalizando los segmentos por pantalla (on-screen digitising). Este proceso fue ejecutado utilizando el software ILWIS 2.2.

Una vez obtenidos los distintos mapas de segmentos (delta1963, delta1967, delta1973, delta1975, delta1980, delta1985,

delta1992, delta1994, delta1997), estos fueron poligonizados de tal forma que se obtuvieron 9 mapas de polígonos correspondientes a las nueve fechas mencionadas (Figura 3). El área de cada uno de los polígonos (que representa el área total del delta en cada una de la fechas) se obtiene simplemente al consultar las tablas generadas automáticamente al poligonizar los mapas de segmentos. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

Figura 3

Mapas de polígono de las superficies del delta del río Guapo (mapas del borde deltáico). 1. 1967; 2. 1973; 3. 1975; 4. 1980; 5. 1985; 6. 1992; 7. 1994; 8. 1997; 9. 1999 (superficie delineada en base posiciones registradas con GPS en campo)

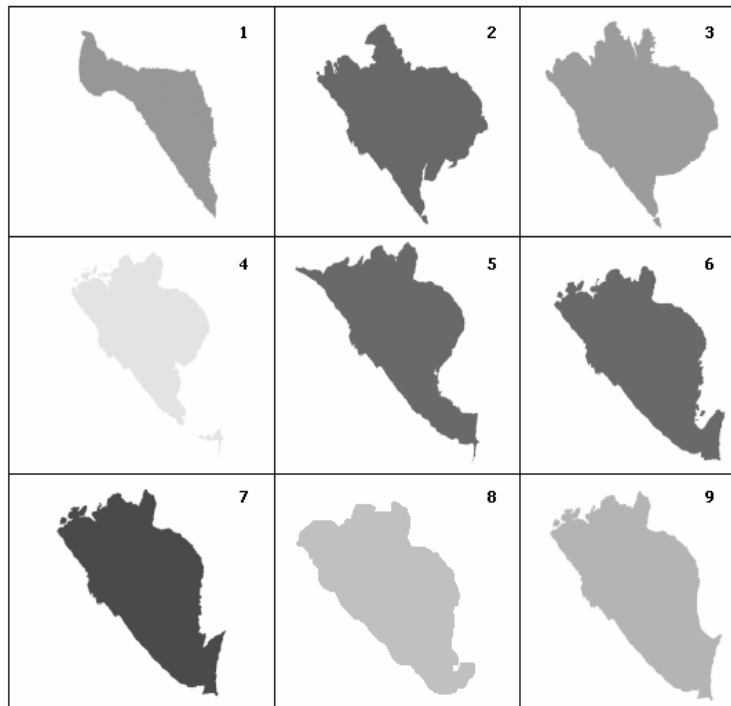


Tabla 4
Área del delta del río Guapo en cada una las fechas estudiadas

Año	1963	1967	1973	1975	1980	1985	1992	1994	1997
Área (ha)	0*	13	97	105	124	143	150	157	164

*0 ha significa que no había formación deltáica en ese momento.

A partir de estas cifras de área total, fueron calculados el crecimiento total del delta (hectáreas), la rata de crecimiento total (ha/año) y el % de crecimiento por año. Los resultados se expresan en la Tabla 5 y figuras 4 y 5.

Tabla 5
Algunos indicadores numéricos del crecimiento del delta

Año	Área Total del Delta (ha)	Período	Crecimiento total (ha)	Crecimiento/año (ha/año)	%crecimiento/año
1963	0	Antes 1963	0	0	0
1967	13.0	1963-1967	13.0	3.3	0
1973	97.2	1967-1973	84.2	14.0	107.7
1975	104.8	1973-1975	7.7	3.8	3.9
1980	124.2	1975-1980	19.4	3.9	3.7
1985	142.9	1980-1985	18.7	4.7	3.8
1992	150.4	1985-1992	7.5	1.1	0.8
1994	157.2	1992-1994	6.9	3.4	2.3
1997	164.0	1994-1997	6.8	2.3	1.4

Figura 4
Curva de crecimiento para el delta del río Guapo

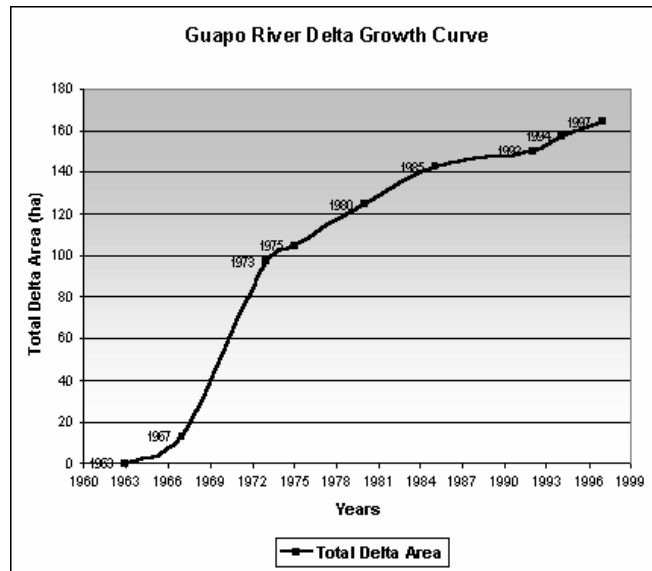
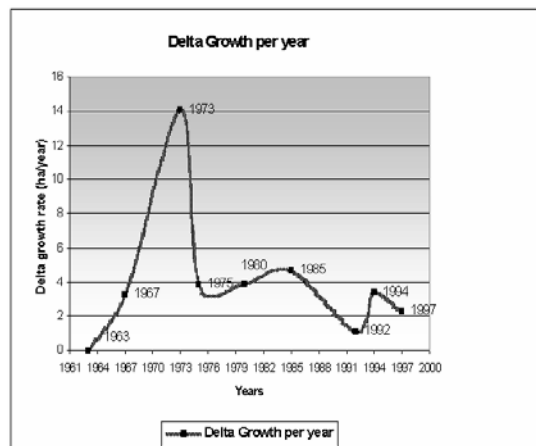


Figura 5
Crecimiento del delta por año (tasa de progradación)



5.2 Patrones espaciales de crecimiento

Además de los indicadores cuantitativos presentados en la sección anterior, se llevó a cabo un análisis del crecimiento espacial y sus tendencias. Se empleó para ello la misma serie multitemporal pero incluyendo fotografías aéreas del año 1961 y 1963, cuando la formación del delta no había comenzado. Como resultado, se generó el mapa de crecimiento espacial del delta en el sector El Guapo.

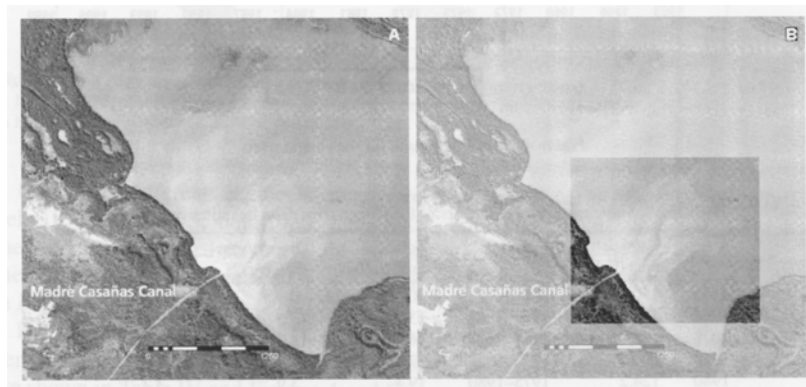
5.2.1 Formación inicial (1961-1963)

Las fotografías aéreas de 1961 así como de fechas anteriores, confirman que antes del inicio de las obras de construcción del Canal Madre Casañas en 1964, no había evidencia de formación deltaica en el sector El Guapo de la Laguna de Tacarigua. Las cifras mostradas en la sección 4.2.1 y las fotografías aéreas de 1963 muestran que, la superficie del delta emergido no se había desarrollado aún para ese año (Figuras 6 y 8).

No obstante, existen evidencias de la existencia de un delta subacuático para 1963 el cual posteriormente progradó hasta emerger a superficie (Figura 6). El inicio de esta formación deltaica en las aguas someras del sector El Guapo ocurre, claramente, como consecuencia de la construcción del canal, favorecido además por las condiciones de aguas someras y tranquilas, rango de mareas limitado (ca. 30 cm) y ausencia de oleaje, prevalecientes en el sector El Guapo, dando origen a un ambiente perfecto para una sedimentación deltaica.

Figura 6

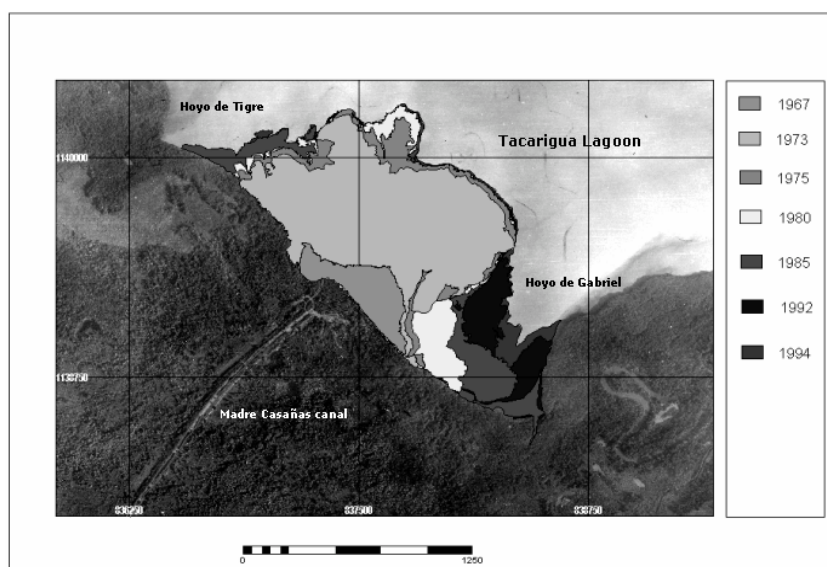
Fotografía aérea que muestra el sector El Guapo en 1963. La pluma de sedimentos y los depósitos subacuáticos someros (delta subacuático) sugieren que la formación del delta ya había comenzado en aquel momento



(Fotografía aérea del Servicio de Geografía y Cartografía Nacional). A. Imagen Original. B. Imagen con mejoramiento de contraste.

En la fotografía aérea de 1967, sólo 4 años después de la construcción del canal, ya es visible un delta emergido en el lugar donde el canal Madre Casañas descarga en la laguna. Esta planicie joven, con una superficie de 13 ha, se formó gracias a una progradación moderada durante este período de formación deltaica (1963-1967). El crecimiento por año fue de 3,3 ha, tal como se deriva de la Tabla 5 y la Figura 5, en la cual la pendiente de la curva sugiere un crecimiento moderado. En 1967, la morfología del delta presenta forma de cúpula (cuspedate), con algunos canales distributarios y una sucesión de plumas de sedimentos a lo largo de su línea de costa, indicando un ambiente deposicional altamente activo (Figuras 7 y 8).

Figura 7
Crecimiento espacial del delta del río Guapo en la Laguna de Tacarigua



La expansión es notable hacia el Norte, siguiendo el canal distributivo principal el cual drena la recién formada planicie en dirección Este-Noreste. Hacia el Este y Oeste, el delta se expande de forma relativamente simétrica debido a los canales distributivos que drenan en esas direcciones. En este estadio de formación, la vegetación ha comenzado a colonizar la joven planicie deltaica con herbazales en las zonas más consolidadas, y plantas acuáticas donde había disponibilidad de sólidos en suspensión (Figura 8).

5.2.2 Máxima progradación deltaica (1967-1973)

En 1973, el delta incrementa su superficie hasta alcanzar 97 ha, con una rata de progradación de 14 ha/año en el período 1967-

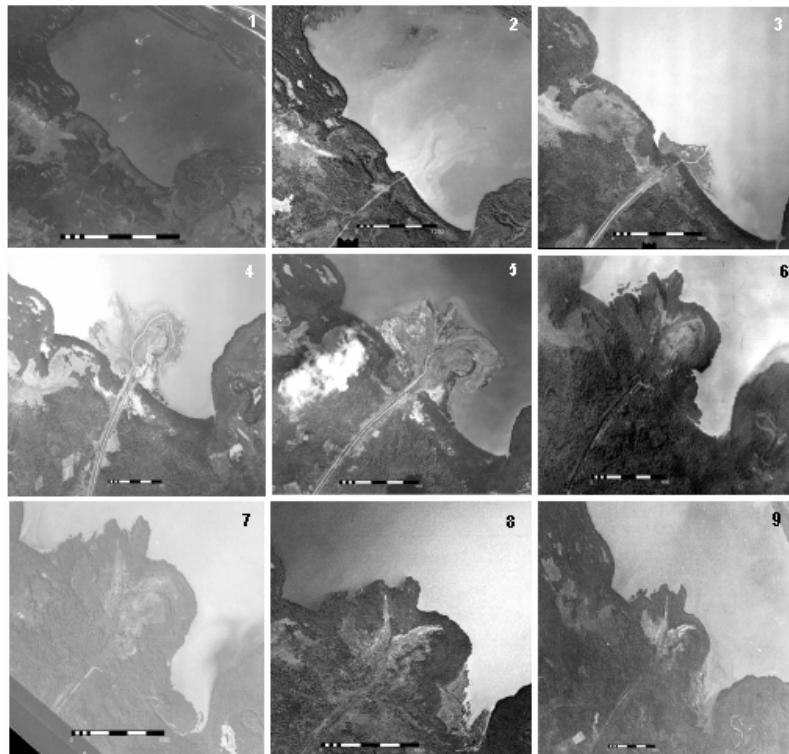
1973. Esta cifra representa el máximo crecimiento por año durante todo el período considerado (Figura 5), con el delta expandiendo su superficie en un 108%. Para el año de 1973, la vegetación terrestre ha comenzado a colonizar la planicie deltaica, sugiriendo un mayor grado de consolidación de los sedimentos.

Durante este período, la expansión es notablemente marcada hacia el Norte y Oeste, observándose que el canal principal sufre un brusco cambio de dirección hacia el Este y se subdivide en numerosos brazos (Figura 8). La morfología del delta evoluciona hacia una de tipo semi-lobular (semi-lobate), desapareciendo la línea de costa relativamente suave que había sido característica en 1967. Estas observaciones indican una influencia fluvial más marcada y el delta muestra un perfil típicamente dominado por el río (river-dominated). Ello también se evidencia en la formación de un lóbulo deltaico en la parte occidental (figuras 7 y 8) debido a la deposición de sedimentos por parte de un canal distributivo altamente activo (Figura 8).

La vegetación continúa estableciéndose a lo largo de la planicie deltaica, particularmente hacia los bordes de los canales distributivos principales. Los herbazales dominan la superficie, aún cuando una franja reducida de manglar ha comenzado a establecerse en la parte Este del delta. No obstante, extensas áreas de la planicie todavía permanecen sin cobertura vegetal en 1973 (Figura 8).

Figura 8

Evolución del delta del río Guapo. 1. 1961; 2. 1963; 3. 1973;
4. 1967; 5. 1975; 6. 1980; 7. 1985; 8. 1992; 9. 1994



(Fotografías aéreas del Servicio de Geografía y Cartografía Nacional).

5.2.3 División en múltiples canales (1973-1975)

Entre 1973 y 1975, el crecimiento continúa aunque en menor proporción, mostrando una tasa de progradación por año de 3,8 ha (Figura 5). Durante este período, muchos canales comienzan a ser rellenados por la intensa sedimentación, estimulando al canal principal a cambiar de curso (migración lateral). Consecuentemente,

el delta se expande hacia nuevas direcciones (Figura 7), lo cual es visible en la parte nor-oriental donde crece mediante un lóbulo muy desarrollado (Figura 8). Por otra parte, la expansión hacia el Oeste declina significativamente ya que el canal distributivo principal ha perdido energía luego de dividirse en múltiples brazos.

En las fotografías aéreas de 1975 se puede apreciar que la vegetación ha cubierto ya una vasta extensión de la planicie deltaica. Los herbazales se han establecido en su parte central y oriental, mientras que en los bordes exteriores, el establecimiento de plantas acuáticas y manglares ya es visible. Algunos grupos aislados de especies del bosque seco tropical también se encuentran en las partes internas y relativamente bien drenadas del delta (Figura 8).

5.2.4 Estabilización relativa (1975-1980)

Para el año de 1980, el delta comienza a mostrar los primeros signos de una relativa estabilización. La vegetación ha colonizado densamente la planicie, y muchos de los canales distributivos antiguamente activos, se han rellenado (Figura 8). El manglar se ha establecido en los bordes exteriores y las especies del bosque seco tropical se han extendido, sobre todo en la parte central del delta. Adicionalmente, se observan en las fotografías aéreas algunos signos de incisión, así como de erosión en surcos y cárcavas en los canales inactivos. Estos rasgos se observan como series de lineamientos paralelos de tono claro en las fotografías aéreas (Figura 8).

También en 1980 ocurre el comienzo de una nueva etapa en el desarrollo del delta. Mientras la “antigua” planicie deltaica (la formada entre 1961 y 1980) se estabiliza gradualmente, los canales activos en la parte oriental son los únicos capaces de transportar sedimentos y continuar la expansión del delta hacia el Este (Figura 8). La formación y crecimiento de esta nueva planicie deltaica en el extremo Este es un proceso que caracterizará la evolución del delta hasta el presente.

5.2.5 Disminución de la tasa de progradación (1985-1992)

A partir de 1985, ocurre una caída significativa en la rata de progradación (Figura 5), lo cual puede tener alguna relación con el represamiento del río Guapo desde 1985 (ver fila sombreada en Tabla 5). Esta obra ocasionó una disminución significativa en la descarga del río Guapo aguas abajo del sitio de presa, así como en el volumen de sedimentos que ingresaban a la laguna a través del canal Madre Casañas.

No obstante, en 1985 el delta continúa expandiéndose principalmente hacia el Este (Hoyo de Gabriel), a través de un canal activo que fluye paralelo a la línea de costa original (Figuras 7 y 8). Al mismo tiempo, la vegetación ha colonizado prácticamente la totalidad de la planicie con herbazales, bosque seco tropical y manglar (al menos tres especies pueden ser observadas) mientras que las plantas acuáticas (reeds) y la vegetación de pantano, gradualmente invaden la recién formada planicie.

5.2.6 Expansión del sector oriental (1992-1994)

Durante la década de los 90, se observa un ligero repunte en la tasa de crecimiento (Figura 5), menos marcado al final de la misma. Este incremento puede interpretarse como una consecuencia de la alta dinámica en el sector del delta oriental, el cual corresponde a las deposiciones más recientes. Los únicos canales que permanecen activos en toda el área del delta se encuentran en esta zona y la carga sedimentaria que transportan es rápidamente depositada en la zona de descarga debido a las condiciones favorables encontradas en el sector de Hoyo de Gabriel (baja profundidad, ausencia de oleaje, mínimo rango de mareas). Esta deposición estimula la colonización de las aguas de la laguna por plantas acuáticas y manglares. Las primeras, usualmente se establecen en aguas turbias, donde hay disponibilidad de carga sedimentaria en suspensión. Ciertos tipos de manglar comúnmente

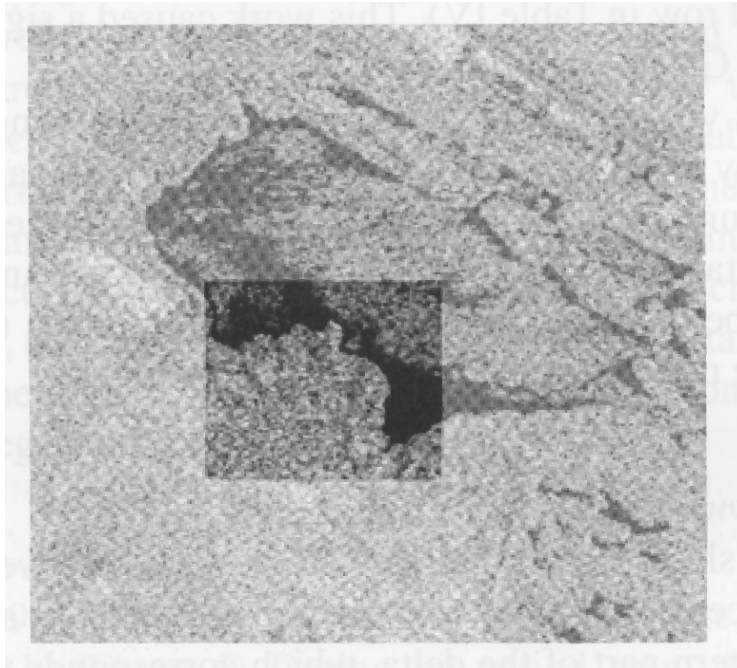
se instalan en depósitos superficiales o subacuáticos poco profundos, formando un denso cordón que da frente a la laguna.

5.2.7 Nueva expansión hacia el sector oriental (1994 al presente)

La tendencia de crecimiento del delta hacia el Este al principio de los 90, continúa hasta el presente, como puede concluirse al interpretar la imagen Radarsat del año 1997 (Figura 9) y a partir de las observaciones de campo (1999). En ese sector, es particularmente significativo el crecimiento acelerado de plantas acuáticas, que se han establecido como vegetación invasiva avanzando hacia la laguna, y contribuyendo a la progradación deltaica. Lo que es incierto, o, al menos, difícil de predecir, es cuál será la tendencia espacial de crecimiento para el futuro. Es razonablemente correcto pensar que esta última tendencia continuará mientras los canales activos descarguen directamente en Hoyo de Gabriel. Pero, ¿qué pasará cuando los actuales canales activos se rellenen? ¿podrían los canales actualmente inactivos, reactivarse bajo condiciones de lluvias extremas y/o descargas excepcionales? Estas son interrogantes que parecen difíciles de responder considerando la falta de información hidrológica en el área y la complejidad de los procesos sedimentológicos en si mismos, que han probado ser arduos de predecir y modelar. En este caso, es importante también considerar el represamiento del río Guapo, lo cual significa que de alguna manera el flujo que ingresa a la laguna es controlado.

Figura 9

Imagen de Radarsat que muestra la superficie deltaica en 1997. (Imagen cedida por Petróleos de Venezuela PDVSA)



6. SÍNTESIS DE LA DINÁMICA DEL DELTA DEL RÍO GUAPO

Como se ha visto a través de la serie de fotografías aéreas históricas, el delta del río Guapo comenzó a edificarse en algún momento entre 1961 y 1963 como consecuencia del desvío de este río por el canal artificial Madre Casañas. Durante las décadas de los 60 y 70, el delta se expandió de manera drástica (Figura 7), alcanzando una superficie de 124 ha en 1980 (Figura 4) y exhibiendo durante este período, la más alta tasa de crecimiento de su historia

(Figure 5). Según se desprende de las cifras calculadas para la década de los 80 (Tabla 4), y particularmente luego del represamiento del río Guapo en 1985, ocurrió una disminución significativa en la expansión del delta durante este período y una tasa de crecimiento en declive (Figura 5), lo cual causó la estabilización relativa de la parte occidental de la planicie deltaica (Figura 8). Durante los 90, la tasa de crecimiento continuó disminuyendo (Figura 5) aún cuando la planicie se expande hacia el sector oriental (Figura 7). En ese sector (Hoyo de Gabriel), el delta es altamente constructivo y geomorfológicamente muy dinámico, gracias a la actividad de dos canales distributarios que alimentan el sistema. Como se constató en el reconocimiento de campo, en la actualidad, la parte occidental del delta se encuentra prácticamente estabilizada, aunque no se descarta una posible reactivación de antiguos canales bajo condiciones de lluvia extrema (como la que afectó el área en diciembre de 1999) y descargas excepcionales. La planicie del sector oriental (Hoyo de Gabriel) es en la actualidad la parte activa del delta y la vegetación coloniza su superficie rápidamente. El delta del río Guapo se mantiene activo en su parte oriental (Hoyo de Gabriel), a través de dos canales distributarios que alimentan el sistema. El crecimiento actual del delta ocurre en este sector, mientras que el crecimiento en el resto de la planicie responde más a la expansión del manglar, que a la de la superficie deltaica como tal. No obstante, la progradación deltaica ha disminuido significativamente en los últimos años, como se desprende de la Figura 5 y Tabla 5, pasando de una tasa de crecimiento de 3.4 ha/año durante el período 1992-1994 a 2.3 ha/año en el período 1994-1997.

7. CONCLUSIONES

En los humedales costeros tropicales, existe una necesidad creciente de monitorear las condiciones ambientales pasadas y presentes. El manejo sustentable de estos dinámicos ecosistemas

demanda un continuo seguimiento de los cambios que ocurren tanto en los componentes naturales como sociales (población, uso de la tierra, actividades económicas como turismo y pesca). Contaminación, sedimentación, conversión de drenajes, explotación inadecuada de los recursos naturales, son todas perturbaciones que pueden afectar, en mayor o menor medida, el frágil emplazamiento de los humedales costeros.

Esta investigación examinó la evolución del delta del río Guapo, en la costa central de Venezuela, por un período de tiempo de 38 años (1961-1999). La metodología adoptada está basada en la interpretación y procesamiento de imágenes aeroespaciales en un ambiente GIS tipo raster, conjuntamente con un trabajo de campo detallado. Como resultado, el patrón de crecimiento del delta del río Guapo ha sido monitoreado, mapeado y numéricamente cuantificado desde su origen (1963) hasta el presente. EL GIS resultó ser una herramienta ideal para procesar las imágenes, integrarlas con mapas temáticos relevantes y calcular indicadores de crecimiento espacial. Además, el uso de una plataforma GIS en el monitoreo del crecimiento de la superficie deltaica, facilitó el ingreso, manejo e integración espacial de la data (en formato digital) de una manera más sistemática y exacta. Más aún, un SIG es particularmente apropiado cuando se trabaja una perspectiva multitemporal, ya que permite tanto la comparación cualitativa (visual) como cuantitativa de los cambios en el tiempo.

Los resultados de la presente investigación podrían permitir a los gerentes del humedal costero de Tacarigua visualizar la evolución temporal del delta, estudiar algunas cifras, analizar tendencias e incluso planificar estudios similares en otras áreas de la laguna afectadas por tasas de sedimentación crecientes. Esto podría constituirse en una sólida base para sustentar futuras decisiones relacionadas con el uso y manejo ambientalmente adecuado del área.

Por último, el estudio podría proporcionar, por un lado, información de línea base para la planificación del área (Reglamentos de Uso de la tierra, Planes de Manejo, diseño de programas de Monitoreo Ambiental y ordenamiento espacial) dentro del marco de la figura de Parque Nacional. Y por otra, podría también emplearse para promover estudios específicos incluyendo no sólo el delta como tal, sino también, otros aspectos críticos que impactan su dinámica, como el canal Madre Casañas. A partir de esta investigación, se podrían derivar algunas aplicaciones prácticas de tal forma que se constituya en una herramienta para el manejo y toma de decisiones en el Parque Nacional Laguna de Tacarigua, por parte de las autoridades de INPARQUES, responsables del ordenamiento ambiental del área.

Agradecimientos

La autora desea agradecer a las siguientes personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta investigación:

- Fundación Gran Mariscal de Ayacucho y antiguo Concejo Nacional de Investigaciones Científicas de Venezuela (CONICIT), hoy Fondo Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (FONACIT).
- Dr. T.W. Hobma y Drs. M. C. J. Damen. Department of Applied Geomorphology, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), Enschede, Holanda.
- Instituto Nacional de Parques de Venezuela (INPARQUES) y Parque Nacional Laguna de Tacarigua.
- Instituto de Geografía y Desarrollo Regional (IGDR), Universidad Central de Venezuela.
- Petróleos de Venezuela (PDVSA).
- Alejandro Calzadilla.

REFERENCIAS

- Chacartegui, F., M. Delgado, B. Cortiula (1998). *Laguna de Tacarigua: complejo sedimentario Isla de Barrera-Laguna litoral progradante en una costa micro-mareal dominada por la energía de las olas* (Informe Técnico RP-080.93). Petróleos de Venezuela PDVSA.
- Clement, A. (1980). El caso de la Laguna de Tacarigua, Estado Miranda. En *Actas del Simposio sobre Contaminación e Impacto Ambiental Marino-Costero* (pp. 147-158). Caracas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- Consultores Técnicos Integrales CTI. (1991). *Programa de Corto Plazo para el mejoramiento ambiental del Parque Nacional Laguna de Tacarigua y otros sitios de interés* (Informe Técnico). Caracas, Venezuela.
- Delgado, J. (1980). *Policy alternatives for mangrove ecosystems. A case study of Laguna de Tacarigua*. Tesis de maestría no publicada, Cornell University, Ithaca, NY, E.E.U.U.
- Edwards, A.J. (Eds.). (2000). *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management*. Centre for Tropical Coastal Management Studies, University of Newcastle upon Tyne, Reino Unido: UNESCO Publishing.
- IUCN. (1999). *The Ramsar Convention on Wetlands*. (En red). Disponible en: www.iucn.org/themes/ramsar.
- Lyon, J. & J. McCarthy (Eds.). (1995). *Wetland and environmental applications of GIS*. Florida, EE.UU.: Lewis Publishers.
- Méndez, W. (1995). *Evolución y caracterización geomorfológica del delta del Río Guapo, Laguna de Tacarigua, Estado Miranda*. Manuscrito no publicado, Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas, Venezuela.
- Méndez, W. (1998). *Morfología del delta lagunar del río Guapo y características sedimentológicas del frente deltaico, Laguna de Tacarigua, Estado Miranda*. Manuscrito no publicado, Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Instituto Pedagógico de Caracas, Venezuela.
- Palminteri, S., G. Powell, G. Ford, y J. Casey, (1999). Applications of a user-friendly GIS to wetlands conservation at the site level. En *People and Wetlands: The Vital Link. Proceedings of the 7th Meeting of the Conference of the Contracting Parties to the Convention on Wetlands*. Disponible en: http://www.ramsar.org/cop7_doc_19.4_e.htm.

- van Westen, C. & J. Farifteh (1997). *The ILWIS 2.1 for Windows User's guide*. Enschede, Holanda.: ILWIS Department, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences ITC.
- Verstappen, H. (1983). *Applied Geomorphology. Geomorphological surveys for environmental development*. Amsterdam, Holanda.: Elsevier.
- Viles, H. & T. Spencer (Eds.). (1995). *Coastal problems. Geomorphology, Ecology and Society at the Coast*. Londres, Inglaterra: Edward Arnold.
- Yang, X. (1995). *Monitoring morphodynamic aspects of the present Huanghe river delta, China. An approach of the integration of satellite remote sensing and geoinformatic systems (GIS)*. Tesis de Maestría no publicada, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences ITC, Enschede, Holanda.

Lista de Abreviaturas

- IGDR**= Instituto de Geografía y Desarrollo Regional. Universidad Central de Venezuela.
- ITC**= International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.
- IUCN**= The World Conservation Union.
- CTI**= Consultores Técnicos Integrales, C.A.
- INPARQUES**= Instituto Nacional de Parques.
- SAGECAN**= Servicio Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional (Hoy, Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar IGVS)
- PDVSA**= Petróleos de Venezuela, S.A.
- MINDUR**= Ministerio de Desarrollo Urbano.
- MARN**= Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales.