

Identificación y clasificación de humedales interiores del estado de Tamaulipas por percepción remota y sistemas de información geográfica

Wilver Enrique Salinas Castillo*
Eduardo Javier Treviño Garza**
Juan Guadalupe Jaramillo Tovías*
Jesús Alejandro Campos Flores*

Recibido: 15 de julio de 2002
Aceptado en versión final: 24 de octubre de 2002

Resumen. El objetivo de este trabajo fue identificar y clasificar los humedales interiores naturales o artificiales en el estado de Tamaulipas, México, de importancia para aves acuáticas migratorias. Históricamente, los esfuerzos en esta clase de estudios se han concentrado en los humedales naturales costeros o cuerpos de agua específicos en las tierras altas; sin embargo, estos levantamientos no han reflejado los cambios dramáticos en el paisaje, debido al desarrollo de la actividad agrícola en el norte de México en décadas recientes, la que junto con sus represas asociadas, proporciona alimento, agua y refugio a muchas aves migratorias y otras especies, lo cual no ha sido bien documentado. Se estudiaron algunos factores que pudieran influenciar el uso de humedales, como tamaño, vegetación asociada y proximidad a zonas agrícolas. El inventario de humedales interiores se basó en el análisis de siete imágenes del satélite Landsat ETM del año 2000, así como en datos de muestreo de 261 sitios de campo visitados durante 2001. Se generaron mapas base y se aplicaron análisis de sistemas de información geográfica (SIG) para clasificar estos cuerpos de agua. Más de 23 000 humedales interiores fueron identificados en el estudio y la información generada será de utilidad para desarrollar programas de manejo y protección de humedales de importancia para aves acuáticas migratorias en Tamaulipas.

Palabras clave: Landsat, migratorias, humedales, sistemas de información geográfica (SIG).

Identification and classification of inland wetlands in Tamaulipas through remote sensing and geographic information systems

Abstract. This work aimed to identify and classify artificial and natural inland wetlands in the state of Tamaulipas, Mexico, important for migratory aquatic birds. Historically, efforts have been focused on natural coastal wetlands or specific water bodies located in highlands; however, these surveys have not reflected the dramatic changes in landscape due to farming development in northern Mexico in the latest decades. Agricultural fields and dams associated to them provide food, water and shelter to many migratory birds and other species, a fact not well documented. Factors that may influence the use of wetlands were analyzed, including surface area, associated vegetation and proximity to agricultural fields. The inventory of inland wetlands was based on the analysis of seven 2000 Landsat ETM satellite imagery and field data gathered from 261 sites surveyed in 2001. Baseline maps were created and GIS analyses were undertaken to classify these water bodies. More than 23 000 inland wetlands were identified, and the information derived from this study will be assist in the development of programs to manage and protect wetlands of importance for migratory aquatic birds in Tamaulipas.

Key words: Landsat, migratory, wetlands, geographical information systems (GIS).

INTRODUCCIÓN

El término humedales se refiere a una amplia variedad de hábitats interiores, costeros y marinos que comparten ciertas características. Generalmente se les identifica como áreas que se inundan temporalmente, zonas

donde la capa freática aflora en la superficie o suelos de baja permeabilidad cubiertos por agua poco profunda. Los humedales sustentan una importante diversidad biológica y, en muchos casos, constituyen hábitats críticos para especies seriamente amenazadas, además de servir de áreas de refugio de muchas

*Unidad Académica Multidisciplinaria Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Victoria, 87149, Cd. Victoria, Tamaulipas. E-mail: wsalinas@uat.edu.mx

**Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Km. 145 Carretera Nacional, 41, Linares, Nuevo León. E-mail: ejtrevin@fci.uanl.mx

especies migratorias. La República Mexicana es reconocida como una región importante para el albergue invernal de millones de aves migratorias, incluyendo las acuáticas provenientes de los Estados Unidos, Canadá y Alaska. Según DUMAC (2002: <http://www.dumac.org>), la población invernante de aves acuáticas migratorias en México se distribuye en un 38 % en los humedales de importancia de la zona costera del Pacífico, en los estados de Baja California y Baja California Sur, Sinaloa y Nayarit; un 35% en la zona costera del Golfo de México, particularmente en los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán; un 11% en los humedales interiores de las tierras altas del país, principalmente en Chihuahua y Durango y, por último, un 16% en los estados de Jalisco y Michoacán, en la zona central del país.

Aunque el estado de Tamaulipas posee humedales naturales costeros de gran extensión, como la Laguna Madre que da albergue a poblaciones importantes de aves migratorias cada invierno, se ha documentado que las aves también utilizan como refugios temporales pequeños cuerpos de agua naturales o artificiales en tierras altas y lejos de la costa del estado (Yépez, 2000:1-11). La caracterización de humedales en México se ha orientado mayormente a las zonas costeras o cuerpos de agua muy específicos en tierras altas, cuyos inventarios no reflejan el dramático desarrollo de la agricultura en el norte y centro de México en las décadas recientes y su efecto en las poblaciones de aves acuáticas migratorias. La actividad agropecuaria y las represas asociadas, de tamaños diversos, proporcionan alimento, agua y abrigo, si bien su importancia no ha sido documentada en forma adecuada, por consiguiente, el objetivo de este trabajo fue identificar, clasificar y generar la cartografía de humedales naturales y artificiales interiores en el estado de Tamaulipas. Se desarrolló un inventario base sobre humedales interiores, utilizando imá-

genes de satélite en un ambiente de SIG, el cual servirá como insumo en la planeación de los recursos naturales del estado, al aportar información sobre los tipos de hábitat que son usados por diversas especies de aves migratorias. Dos aspectos de relevancia fueron cubiertos: la identificación de los tipos de cobertura y proximidad a las zonas de cultivo alrededor de los cuerpos de agua, y la determinación de la densidad y tamaño promedio de las represas artificiales y cuerpos de agua naturales interiores.

DEFINICIÓN E IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES

La Convención de Humedales de Ramsar en 1971 (DUMAC, 2002, <http://www.dumac.org>) los definió como:

las 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 de marea baja no exceda de seis metros.

El Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos los caracterizó como:

una tierra donde los niveles freáticos están cerca o arriba de la superficie lo suficientemente extensa para promover la formación de suelos hídricos o para soportar el crecimiento de plantas hidrófitas (Lillesand y Kiefer, 1987:177).

Ramsey III (1998:211) mencionó que los humedales son ecosistemas altamente productivos y que, en relación con el total de biomasa producido, sólo la agricultura excede a los pantanos y manglares, además, están ligados a mucha de la productividad del océano y proporcionan áreas críticas

de anidamiento para una multitud de vida costera.

Antes de la década de los años cincuenta, algunas de las especies que invernaban en Tamaulipas lo hacían en el delta del río Grande con poblaciones de algunos miles de individuos; sin embargo, el rápido incremento de la actividad agrícola en la zona, particularmente de los cultivos de sorgo y maíz, dio origen a un crecimiento significativo de la población de varias especies migratorias, como el del ganso frente blanca proveniente de Canadá. La cercanía de las zonas agrícolas de producción a las lagunas, bahías y presas de las zonas de descanso tradicional de aves migratorias en la costa de Tamaulipas tuvo el efecto de que muchas especies adoptaran estas áreas como nuevas zonas de alimentación. Adicional a la disponibilidad de abundante alimento, en los últimos 30 años los productores han construido un número importante de pequeñas lagunas artificiales como abrevaderos, las cuales en conjunto con la topografía, el clima y la vegetación circundante o en las cercanías de dichos cuerpos de agua, se han convertido en refugios temporales y conforman ahora un complejo de humedales artificiales que son una fuente constante de agua dulce para diversas especies de aves migratorias.

CONSERVACIÓN DE HUMEDALES

La conferencia "The International Forested Wetlands Resource: Identification and Inventory" sostenida en Baton Rouge, Louisiana, en 1988 (Jackson, 1990:1-3), permitió el reconocimiento de que los humedales representan una significativa y única porción de los sistemas biológicos del planeta y, que por tanto, requieren de atención especial. Dos resoluciones surgieron de dicha conferencia; por un lado, contribuir en un esfuerzo serio de monitoreo global y, por el otro, promover la continuidad de datos de satélite para el inventario de estos recursos, principalmente del satélite Landsat, debido a

la disponibilidad de datos existente desde 1972. Sin embargo, los humedales han sufrido cambios importantes en las últimas décadas, pese a la creciente demanda pública a nivel mundial para su conservación y la vida silvestre asociada. Según Guillemain *et al.*, (2002:183-184), los cambios se han manifestado en la pérdida de hábitats, debido principalmente a la agricultura, creando nuevos paisajes en una matriz compleja de espacios transformados en sistemas de producción, pero conteniendo pequeñas áreas aisladas del ecosistema original. No obstante, los campos agrícolas han compensado de alguna manera estos efectos, al atraer a aves acuáticas cuando en los alrededores de estas pequeñas islas hay abundante disponibilidad de alimento. Tal como lo apuntaron Lassoie y Buck (1991), citados por Pierce *et al.* (2001:334), es posible desarrollar un nuevo modelo que saque provecho de la diversidad del paisaje actual y mejore las condiciones de los hábitats, pero que, además, provea incentivos que permitan a los productores agrícolas el manejo de la tierra como un sistema que maximice la rentabilidad y el manejo sostenible de recursos, es decir, un sistema agroforestal.

La propuesta de manejo de hábitats dentro de agroecosistemas requiere, no obstante, de la habilidad de poder pronosticar las consecuencias de los cambios ambientales producidos por el hombre (Pierce *et al.* 2001:333-334). Para ello, la realización de inventarios que cuantifiquen y evalúen hábitats a diferentes escalas espaciales es cada vez más esencial en el manejo de ecosistemas, ya que muchas de las decisiones tienen que ser hechas a nivel de paisaje. El cambio de enfoque de escalas pequeñas a grandes está en relación con los avances tecnológicos en percepción remota, sistemas de información geográfica y métodos para cuantificar atributos del paisaje. La interacción entre prácticas agroforestales y el manejo de humedales en ambientes alterados

ha demostrado ser adecuada para la conservación de dichos ecosistemas. Ratti *et al.* (2001:676, 682), en un estudio llevado a cabo en Dakota del Norte y Dakota del Sur en los Estados Unidos, compararon 39 humedales restaurados en ambientes con condiciones no originales respecto a 39 humedales naturales sin perturbación, con el propósito de evaluar el efecto de estas dos condiciones en las comunidades de aves.

La comparación tomó en cuenta, además de características similares en cuanto a tamaño y condiciones geográficas, la densidad de aves por tipos de humedal, hábitos de alimentación y abundancia de aves acuáticas y no acuáticas, además de parámetros de riqueza de especies y diversidad. Dado que los humedales restaurados estaban considerados en peligro, los resultados fueron alentadores, ya que mantuvieron la capacidad de sostener la biodiversidad al mismo nivel que aquéllos en su estado natural (Noss *et al.*, 1995, citado por Ratti *et al.* 2001:682). Más evidencia de los impactos benéficos que han tenido los programas de conservación de humedales en algunas regiones de América del Norte puede ser consultada en el trabajo de Reynolds *et al.* (2001), el cual muestra el impacto positivo obtenido sobre cinco especies de patos del Programa de Conservación de Reservas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

OBSERVACIÓN REMOTA EN EL INVENTARIO DE HUMEDALES

Un inventario de estos ecosistemas requiere de un sistema que los caracterice adecuadamente, en este sentido, Cowardin *et al.* (1979:5-30), trabajando para el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, desarrollaron un sistema completo de clasificación de humedales. Si bien este esquema de categorización es muy amplio y desarrollado para las condiciones de Estados Unidos, algunas de estas clases pueden

ser aplicadas a las características de los humedales en México.

Por otro lado, tal como apunta Lund (1990:564-565), la necesidad de tener formas más específicas y de bajo costo para hacer inventarios de humedales está cambiando la forma tradicional de hacerlo. Las fotografías aéreas han sido el insumo más utilizado en el inventario de humedales, como lo reportan los trabajos de Warner (1990), Ibrahim y Hashim (1990) y Tiner (1990). Sin embargo, el uso de imágenes de satélite ofrece, además de la información que dan las fotografías aéreas, el poder conducir investigación sobre la estructura biológica del humedal, así como el desarrollo de esquemas de manejo cuando se combina con otras capas de información. Hewitt (1990:618) demostró la utilidad de emplear imágenes del satélite Landsat TM (*Thematic Mapper*) por sus características espectrales, espaciales y radiométricas para el inventario de ecosistemas riparios. Elvidge *et al.* (1998:191, 207) evaluaron la utilidad de las escenas Landsat MSS (*Multispectral Scanner*) en estudios sobre la tendencia del vigor de la vegetación de humedales, utilizando una serie de tiempo construida a partir de este tipo de imágenes para un periodo de 14 años. Mediante el manejo espacio-temporal de los datos fue posible identificar un ciclo agregado de crecimiento de la vegetación, así como la determinación de las alzas y bajas en el vigor de la vegetación de humedales relacionados con patrones regionales de precipitación.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

La identificación de los cuerpos de agua interiores del estado de Tamaulipas se llevó a cabo mediante el procesamiento digital de siete imágenes Landsat ETM (*Enhanced Thematic Mapper*) del año 2000, que cubren la totalidad de la entidad así como una pequeña parte del estado de Nuevo León, mientras que la información sobre el tipo de

cobertura presente alrededor de los humedales se obtuvo a partir de la cartografía digital 1:250 000 del Inventario Forestal Nacional 2000-2001, el cual utiliza la misma distribución temática y nomenclatura de identificación de cartas del INEGI (Figura 1).

En el Cuadro 1 se presentan las fechas de adquisición de las escenas Landsat, así como su relación con el patrón general de lluvias en el área de estudio, la cual se obtu-

vo de la información de normales climatológicas (1966-1999) de estaciones meteorológicas tipo, ubicadas dentro de cada imagen. El procesamiento digital de imágenes fue llevado a cabo con el sistema ERDAS-Imagine 8.5, mientras que el manejo de la información vectorial y bases de datos georreferenciados, se operaron con el sistema de información geográfica Arc-Gis versión 8.1, ambos sistemas para Windows 2000.

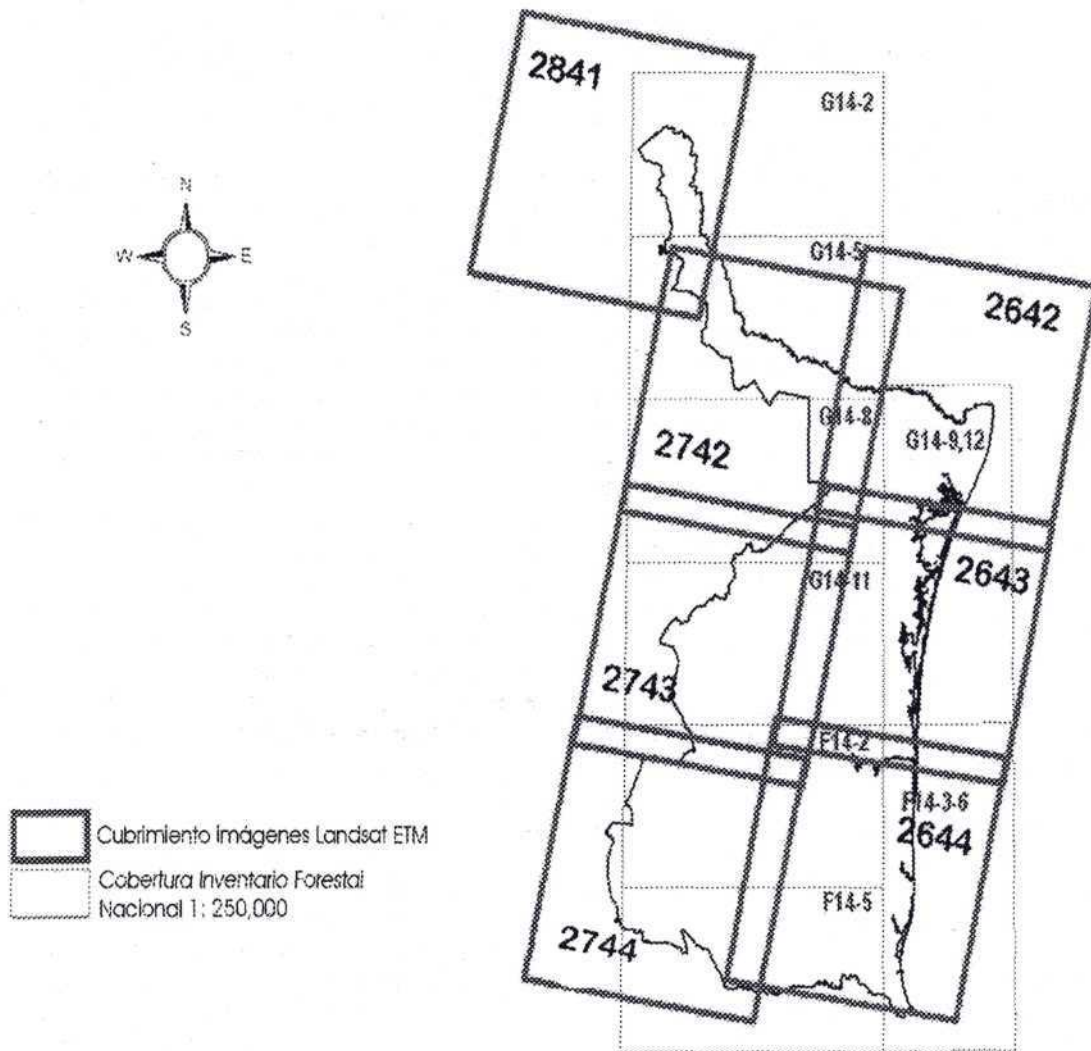


Figura 1. Distribución de cartas del Inventario Forestal Nacional en el estado de Tamaulipas y cobertura de imágenes Landsat ETM.

Se contó, además, con la información de humedales costeros, obtenida a partir de un trabajo de clasificación digital con escenas Landsat de 1993 realizada por DUMAC (*Ducks Unlimited de México A.C.*), el cual se concentró exclusivamente en el sistema de lagunas maréales e intermareales del estado de Tamaulipas. El nivel de información requerido para la evaluación de los hábitats de humedales interiores contempló sólo grandes grupos de vegetación y usos generales del suelo, por lo que se efectuó una re-codificación y disolución de polígonos de las clases originales de la cartografía de usos del suelo y vegetación del Inventario Forestal Nacional, resultando las siguientes asentamientos humanos, agricultura, pastizales, selvas, mezquitales, matorrales, vegetación halófila, vegetación de dunas, áreas sin vegetación, bosques y vegetación de galería. El sistema de clasificación de humedales utilizado en el proyecto es una modificación del desarrollado por Cowardin *et al.* (1979; Cuadro 2), tomando sólo en cuenta los

humedales de agua dulce interiores, ya sean naturales o artificiales, excluyendo los humedales marinos y estuarinos de la costa tamaulpeca, ya que no constituyen el objetivo de este trabajo. Sin embargo, es conveniente mencionar que la información sobre la situación presente de estos hábitats en el estado está siendo desarrollada actualmente por DUMAC.

Para obtener una separación agua-tierra, como parte del proceso de segmentar las imágenes a los sitios de interés, se utilizó un índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (IVDN), producto de la combinación lineal de la reflectancia de los canales espectrales rojo visible (R_r) e infrarrojo medio (R_{imed} , Baret, 1991:156) de las siete imágenes Landsat disponibles para el proyecto.

$$IVDN =$$

Generalmente, la banda infrarrojo cercano centrada en el rango de longitud de onda

Cuadro 1 Fechas de adquisición de escenas Landsat en relación a la época de lluvias

Fecha	Año	Path	Row	Estación climática	Época de lluvias
Abril 6	2000	26	42	Matamoros	Húmeda
Enero 1	2000	26	43	San Fernando	Seca
Abril 22	2000	26	44	Tampico	Seca
Febrero 25	2000	27	42	Camargo	Seca
Febrero 25	2000	27	43	Villagrán	Seca
Enero 8	2000	27	44	Jaumave	Seca
Marzo 19	2000	28	41	Nuevo Laredo	Seca

Cuadro 2 Sistema de clasificación de humedales interiores adaptado de Cowardin *et al.*, (1979)

Sistema	Subsistema	Clases
Agua dulce	Natural	Agua abierta Vegetación acuática Emergente Riverino agua abierta Riverino con vegetación Agua abierta Vegetación acuática Emergente

0.750-0.900 micrones es la más utilizada para la generación del *WDN* cuando el objetivo es la evaluación de biomasa en coberturas vegetales, pero, dado que el interés del proyecto se centró en la obtención de las superficies con cuerpos de agua o suelos semi-inundados, la banda infrarrojo medio con un rango espectral de 2.090-2.350 micrones (banda 7) fue ideal para la discriminación del contenido de humedad en suelos. Algunos trabajos reportan la utilidad de cambiar el canal cercano infrarrojo por el infrarrojo medio en la elaboración de índices de vegetación (Nemani *et al.*, 1993:2519-2522). El *IVDN* se caracteriza por un comportamiento asintótico con incrementos por la densidad de hojas verdes, sus valores van de -1 a +1, con un usual rango de -0.75 a +0.75 (Thiam y Eastman, 1999:117-118). Una alta actividad fotosintética resultará en altos valores del índice, de lo cual a su vez se infieren altas cantidades de biomasa verde. Bajos valores ocurren para áreas con poca vegetación, un valor de 0 representa un valor aproximado a la no vegetación, por consiguiente, valores negativos indican áreas sin vegetación.

Una de las ventajas de utilizar el *IVDN* para la identificación de cuerpos de agua es su cualidad de normalización de datos. Al transformar los datos originales de las bandas individuales se reducen de manera significativa las diferencias particulares que pudieran manifestar los cuerpos de agua entre las diferentes fechas de imágenes. Con estas consideraciones se generaron los *IVDN* a partir de cada una de las imágenes Landsat y se determinó el umbral más representativo. El valor de umbral más adecuado para discriminar entre tierra y cuerpos de agua, fue -0.4, y sirvió para generar una clasificación de únicamente dos clases mediante la aplicación de operadores relacionales; agua (≤ -0.4) y tierra (> -0.4). Posteriormente se vectorizó la clasificación resultante generándose una cobertura de polígonos de la que se extrajeron únicamente los perímetros

de los cuerpos de agua para crear una nueva cobertura.

Las lagunas costeras mareales e intermareales no fueron incluidas en el proceso de vectorización, ya que fueron eliminadas previamente, al aplicarse una máscara numérica en las imágenes *IVDN* a partir de la información disponible de la clasificación de humedales costeros realizada por DUMAC.

Se tomó el criterio de incrementar el perímetro de los cuerpos de agua mediante la aplicación de una zona de influencia (*buffer*) de 250 m alrededor de cada uno de los polígonos a manera de incluir también áreas con la vegetación circundante. Esta información fue sobrepuesta en una composición en falso color de cada escena Landsat ETM, utilizando la combinación de bandas RGB 4,5,3 (infrarrojo cercano, infrarrojo medio y rojo visible). Adicionalmente se incluyó la información sobre poblados, caminos y carreteras y la retícula temática 1:50 000 del INEGI. A partir de esta información se definieron los sitios de muestreo y se imprimieron mapas de campo de los sitios seleccionados basados en la retícula cartográfica del INEGI. Se levantaron 261 sitios de muestreo (Figura 2) exclusivamente sobre los humedales interiores, obteniéndose información sobre características físicas y biológicas, así como la identificación de aves al momento de la visita.

La ficha de campo se estructuró para obtener datos de la localización del humedal, el tipo de sistema al que pertenece, la existencia de zonas agrícolas a una distancia de 5 km del sitio, detalles sobre las clases del tipo de humedal encontradas, especies vegetales y una aproximación de su porcentaje de cobertura. También se obtuvo información sobre la presencia de aves de manera general y, en particular, sobre poblaciones de gansos y patos como especies indicadoras de aves acuáticas migratorias, con lo que se generó un listado de las especies, identi-

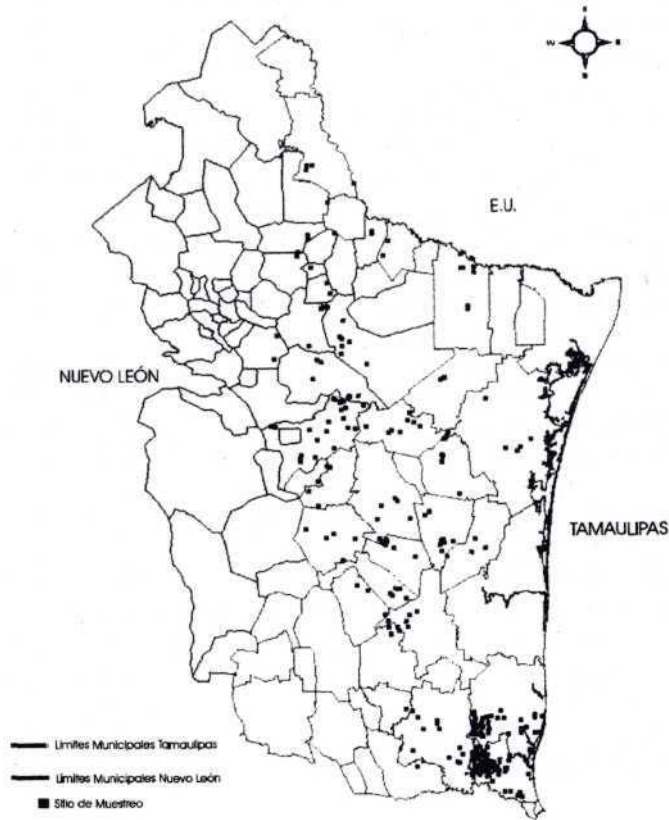


Figura 2. Distribución de sitios de muestreo de humedales interiores.

ficadas mediante su nombre científico y común. El método de estimación de aves utilizado fue el de *Conteo por Campo Visual*, el cual se basó en la observación directa de un grupo de individuos de aves acuáticas migratorias (patos o gansos). Primeramente se ubicó un extremo de la población, tomando como base el campo visual del telescopio o binoculares, y se estimó la población para ese campo, posteriormente la estimación se completó, al correr el campo visual al resto del grupo. Este método requirió del entrenamiento visual de los observadores para llevar a cabo los muestreos, ya que la estimación de la población o de las poblaciones se hace con base en la dispersión o disposición de las aves en un área dada.

Los procesos de clasificación digital no fueron aplicados al área total de las imágenes, sino únicamente a los cuerpos de agua y a su zona de influencia (buffer de 250 m). Mediante la utilización del programa AOI (*Area of Interest*) del sistema ERDAS, los polígonos de cuerpos de agua obtenidos fueron definidos como AOI's, generándose un archivo vectorial ligado a los perímetros de la totalidad de cuerpos de agua de cada escena. Con ello fue posible acotar el procesamiento digital de imagen únicamente a estas áreas, dejando intocable todo aquello fuera de las mismas. El proceso de clasificación de las escenas Landsat ETM fue del tipo no supervisado, lo que generó un total de 30 clases espectrales mediante el algo-

ritmo de *cluster* ISODATA (*Interactive Self-Organizing Data Analysis*). La asignación de las etiquetas temáticas para cada clase espectral se realizó en función de la información de la base de datos obtenida de los muestreos de campo. Por último, se definió el criterio de integrar una sola cartografía escala 1:250 000, por lo que se generaron los mosaicos de la clasificación temática tomando como referencia la distribución de cartas del Inventario Nacional Forestal. Para identificar el tipo de cubierta que rodea a los humedales interiores, que son preferidos por aves acuáticas migratorias, se utilizó la información únicamente de los sitios de muestreo que tuvieron avistamientos positivos de dichas especies, tanto al momento de levantar la hoja de campo, como por información adicional histórica obtenida de entrevistas con residentes aledaños al humedal. Los sitios de muestreo que cumplieron esta condición fueron extraídos de la cobertura original de puntos, generándose una nueva cubierta sobre la que se aplicó un proceso de *buffer* o área de influencia, tomando un radio de 5 km a partir de las coordenadas GPS del sitio visitado. Con esta nueva información se generaron estadísticas zonales mediante una tabulación cruzada entre los polígonos de influencia de cada punto y los mapas recondicionados del Inventario Forestal Nacional.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Figura 3 se presenta un segmento de la imagen Landsat ETM 26/44 correspondiente a la parte sur del estado en los municipios de Mante, González y Altamira, donde se resalta la diferencia de los cuerpos de agua (áreas de color oscuro) respecto al resto de las coberturas presentes en la zona. La información de los cuerpos de agua obtenidos de las imágenes *IVDN*, al ser convertida a un formato vectorial, permitió asociar datos alfanuméricos adicionales de la información proveniente de los muestreos de campo, así como para el cálculo del número y superficie de los humedales interiores en-

contrados. En la Figura 4 se presenta el resultado de la vectorización del *IVDN* para la misma zona.

Las estadísticas de cuerpos de agua obtenidas se presentan en el Cuadro 3. Puesto que los datos generados fueron integrados en un mosaico que siguió la distribución de la cartografía del Inventario Nacional Forestal, se utilizó la clave de la carta para facilitar la interpretación y ubicación geográfica de los datos y se aplicó un sistema arbitrario de clasificación por rangos de superficie de dichos cuerpos de agua, sin tomar en cuenta el tipo de humedal. Al observar los datos del Cuadro 3 se aprecia que, a excepción de las zonas correspondientes a la carta G-14912 y G-148 correspondientes a la mitad de la parte costera del estado y a una zona del norte de la entidad y del estado de Nuevo León (Figura 1), la mayoría de los humedales interiores fueron menores de una hectárea. De un total de 23 570 cuerpos de agua interiores, aproximadamente el 68% tiene menos de 10 000 m² de extensión. En segundo orden de importancia aparecen aquellos humedales mayores a una hectárea pero inferiores a 50 ha, lo que da idea de la cantidad de pequeños almacenamientos hechos por los agricultores en todo el estado de Tamaulipas y de Nuevo León.

La selección de los sitios de muestreo estuvo en función de su facilidad de acceso, debido a que muchos humedales previamente identificados en las impresiones en falso color como sitios potenciales, se localizaron en predios privados, a los que no fue posible acceder por la falta de autorización de sus propietarios. Este problema ocasionó que el muestreo de campo tuviera que ser del tipo dirigido y no al azar. Además de los aspectos físicos, biológicos y de vida silvestre residente en estos cuerpos de agua, se incluyó un apartado de presencia o ausencia de gansos y patos, lo cual es un parámetro relevante para la identificación de humedales importantes para aves acuáticas migratorias.

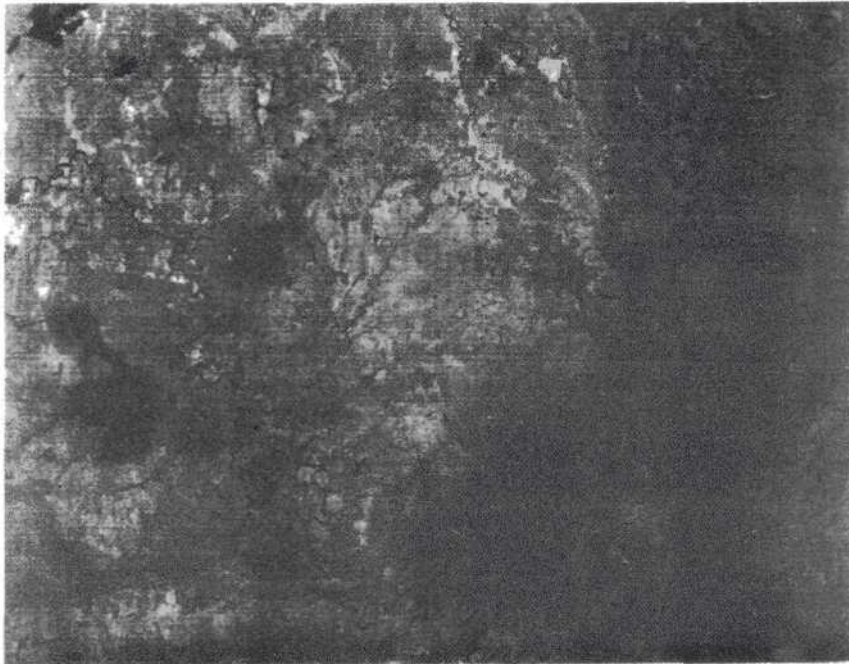


Figura 3. *IVDN* generado a partir de la subescena extraída de la imagen ETM 2644.

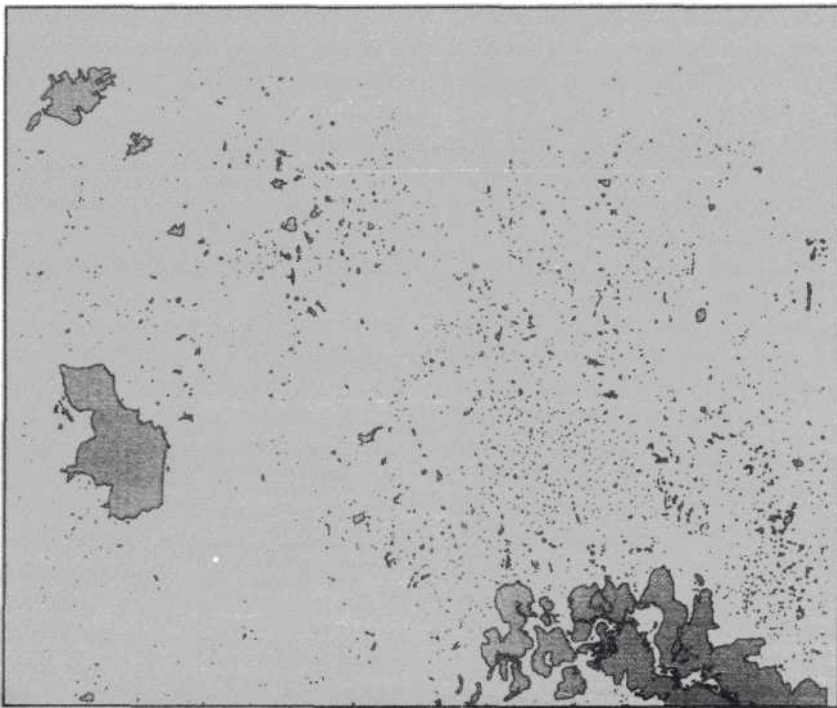


Figura 4. Cuerpos de agua vectorizados a partir de su determinación mediante el *IVDN*.

Cuadro 3. Número de cuerpos de agua por carta temática 1:250 000 (Inventario Nacional Forestal) y rangos de superficie

Rangos	G-1411	G-145	G-148	G-14912	F-142	F-1436	F-145
< 1 ha	1 033	3 754	1 542	853	1 238	3 607	3 990
>= 1ha < 50 ha	508	1 021	2 644	964	463	787	969
>= 50 ha < 100 ha	9	4	10	33	7	7	9
>= 100 ha < 500 ha	15	9	5	32	3	3	12
>= 500 ha < 1 000 ha	0	1	1	11	1	2	1
>= 1 000 ha	2	2	1	6	1	3	7
<i>Total de cuerpos de agua</i>	<i>1 567</i>	<i>4 791</i>	<i>4 203</i>	<i>1 899</i>	<i>1 713</i>	<i>4 409</i>	<i>4 988</i>

De los 261 sitios de muestreo, solamente en 135 humedales interiores se registró la presencia de gansos y patos en el rango de 1 a 50 individuos, aquí también se incluyen aquellos humedales que, si bien no aportaron evidencia de la presencia de aves migratorias en el levantamiento de la ficha de campo, al entrevistar a productores se obtuvo información que indicaba su uso hecho en el pasado. En la ficha de campo, además del rango anterior, se contó con dos intervalos adicionales para la descripción de poblaciones de aves acuáticas migratorias (51-5 000; > 5 000). De los 135 humedales con registros positivos, 18 de ellos reportaron la presencia considerable de gansos y patos en el rango de 51 a 5 000 individuos y sólo tres humedales reportaron más de 5 000 individuos.

Cabe mencionar que el criterio de utilizar estos niveles de clasificación de poblaciones obedece, más que llevar a cabo un conteo preciso de aves, a que el proyecto estuvo orientado a la estimación en rangos lo suficientemente amplios para clarificar la situación de poca, mediana o abundante presencia de patos y gansos. En el Cuadro 4 se presenta el listado de especies con su nombre científico y común, agrupadas en las categorías de aves badeadoras, playeras, rapaces, patos, gansos y otras que fueron identificadas en los muestreos de campo.

Con la información del tipo y clase de humedal de los 261 sitios de muestreo y de acuer-

do al sistema de Cowardin *et al.* (1979), se etiquetaron y agruparon las 30 clases extraídas de la clasificación no supervisada. En el Cuadro 5, además de las estadísticas resultantes de la clasificación de humedales interiores, mediante una sobreposición de capas de información, se integraron también las estadísticas de las clases generalizadas del Inventario Nacional Forestal y de la clasificación de humedales costeros realizada por DUMAC, con el propósito de tener una visión completa de los humedales tamaulipecos y el paisaje en el que están insertos. En el caso específico del grupo de humedales, la clase dominante correspondió a agua dulce artificial agua abierta, si se suman las superficies encontradas para cada carta, se encuentra una extensión total de 106 736 ha, lo que da una idea de la importancia de este tipo de humedal en el estado de Tamaulipas.

Para determinar los tipos de cobertura presentes alrededor de los humedales identificados como probables sitios potenciales de conservación, debido a la preferencia de uso por aves acuáticas migratorias indicadoras (gansos y patos), se procedió a generar nuevas coberturas de puntos únicamente en aquellos sitios que reportaron presencia, actual o histórica, de dichas especies. En el Cuadro 6 se presenta el número de sitios detectados por carta y a partir del código de identificación de cada punto de muestreo se eliminaron todos aquéllos que no reportaron presencia de gansos y patos.

Cuadro 4 Listado de especies de aves avistadas en los humedales visitados

Grupo	Nombre científico	Nombre común
BADEADORAS	<i>Ajaia ajaja</i> <i>Gallinula chloropus</i> <i>Egretta caerulea</i> <i>Ardea herodias</i> <i>Casmerodius albus</i> <i>Pelecanus erythrorhynchos</i> <i>Fulica americana</i> <i>Nycticorax nycticorax</i> <i>Egretta thula</i> <i>Bubulcus ibis</i> <i>Butorides striatus</i> <i>Mycteria americana</i> <i>Phalacrocorax brasilianus</i> <i>Tachybaptus dominicus</i> <i>Anhinga anhinga</i> <i>Podilymbus podiceps</i>	Espátula rosada Gallineta frente roja Garceta azul Garza morena Garza blanca Pelicano blanco Gallareta americana Pedrete corona negra Garceta pie-dorado Garza ganadera Garceta verde Cigüeña americana Cormorán oliváceo Zambullidor menor Anhinga americana Zambullidor pico grueso
PLAYEROS	<i>Jacana spinosa</i> <i>Gallinago gallinago</i> <i>Himantopus mexicanus</i> <i>Charadrius vociferus</i> <i>Tringa melanoleuca</i> <i>Calidris himantopus</i> <i>Tachybaptus dominicus</i> <i>Calidris canutus</i> <i>Numenius americanus</i> <i>Recuvirostra americana</i>	Jacana norteña Agachona común Candlero americano Chorlo tildio Patamanilla mayor Playero zancón Zambullidor menor Playero canuto Zarapito pico largo Avoceta americana
RAPACES	<i>Buteo albicaudatus</i> <i>Pandion haliaetus</i> <i>Polyborus plancus</i> <i>Parabuteo unicinctus</i> <i>Falco femoralis</i> <i>Falco sparverius</i> <i>Elanus leucurus</i> <i>Falco peregrinus</i> <i>Circus cyaneus</i>	Aguililla cola larga Gavilán pescador Caracara quebranta huesos Aguililla rojinegra Halcón fajado Cernicalo americano Milano cola blanca Halcón peregrino Gavilán rastrero
PATOS Y GANSOS	<i>Dendrocygna bicolor</i> <i>Anas clypeata</i> <i>Anas strepera</i> <i>Anas acuta</i> <i>Aythya americana</i> <i>Anas americana</i> <i>Anser albifrons</i> <i>Chen caerulescens</i> <i>Bucephala albeola</i> <i>Oxyura jamaicensis</i>	Pijije canelo Pato cucharon Pato pinto Pato golondrino Pato cabeza roja Pato chalcuán Ganso frente blanca Ganso nevado Pato monja Pato tepalcate
GAVIOTAS	<i>Larus delawarensis</i> <i>Sterna forsteri</i> <i>Larus argentatus</i> <i>Sterna sandvicensis</i> <i>Larus philadelphia</i> <i>Sterna nilotica</i> <i>Larus atricilla</i> <i>Sterna hirundo</i>	Gaviota pico anillado Charrán de Forster Gaviota plateada Charrán de Sandwich Gaviota de Bonaparte Charrán pico grueso Gaviota reidora Charrán común
OTRAS	<i>Agelaius phoeniceus</i> <i>Quiscalus mexicanus</i> <i>Stelgidopteryx serripennis</i> <i>Pyrocephalus rubinus</i> <i>Zenaidura macroura</i> <i>Sturnella magna</i> <i>Cathartes aura</i> <i>Coragyps atratus</i> <i>Molothrus aeneus</i> <i>Columbina inca</i> <i>Corvus corax</i> <i>Mimus polyglottos</i> <i>Tyrannus forficatus</i> <i>Caracara plancus</i> <i>Cardinalis cardinalis</i> <i>Melanerpes aurifrons</i>	Tordo sargento Zanate mexicano Golondrina ala aserrada mosquero Cardenal Paloma huilota Alondra triguera Zopilote aura Zopilote común Tordo ojo rojo Tórtola cola larga Cuervo común Centzontle norteño Timo tjereta rosado Caracara quebrantahuesos Cardenal rojo Carpintero cheje

Cuadro 5. Estadísticas de superficie en hectáreas de uso actual del suelo, tipos de vegetación y de humedales por carta temática 1:250 000

Clases	G-1411	G-145	G-148	G-14912	F-142	F-1436	F-145
1/ Asentamiento humano	6 570	11 424	8 000	13 859	8 244	11 546	10 318
1/ Agricultura	396 927	117 571	670 442	511 484	362 905	10 067	567 939
1/ Pastizales	380 590	362 252	671 057	14 872	299 424	264 451	305 347
1/ Selvas	8 832	-	-	198	449 791	59 566	233 341
1/ Mezquitales	143 146	121 672	234 186	15 186	9 976	-	31 136
1/ Matorrales	1 006 499	264 362	568 426	100 411	548 947	6 556	226 280
1/ Vegetación halófila	-	2 147	29 597	144 997	1 032	5 413	3 295
1/ Vegetación de dunas	-	-	-	-	-	165	-
1/ Áreas sin vegetación	-	407	-	-	-	1 613	-
1/ Bosques	277 562	3 540	15 811	-	554 002	-	171 623
1/ Popal-Tular	2 867	-	4 076	-	-	231	1 624
1/ Vegetación de galería	-	-	-	-	547	-	-
2/ Marino submareal agua abierta	-	-	-	23 616	-	550	-
2/ Marino intermareal playa	-	-	-	-	-	97	-
2/ Estuarino submareal agua abierta	-	-	-	163 251	-	15 460	-
2/ Estuarino submareal vegetación acuática	-	-	-	33 973	-	2 913	-
2/ Estuarino intermareal vegetación acuática	-	-	-	3 752	-	6 734	-
2/ Estuarino intermareal llanura costera	-	-	-	41 713	-	13 327	-
2/ Estuarino intermareal llanura costera modificada	-	-	-	1 408	-	3 523	-
2/ Estuarino intermareal emergente	-	-	-	18 825	-	4 155	-
2/ Estuarino intermareal manglar	-	-	-	-	-	3 518	-
3/ Agua dulce natural agua abierta	28	-	-	12 419	-	8 567	20 339
3/ Agua dulce natural vegetación Acuática	-	-	-	4 315	-	2 810	10 353
3/ Agua dulce natural emergente	-	-	-	29 961	-	6 496	6 001
3/ Agua dulce artificial agua abierta	10 996	32 370	17 684	69	20 007	4 930	20 676
3/ Agua dulce artificial vegetación acuática	-	-	-	-	66	-	-
3/ Agua dulce artificial emergente	17	-	-	-	-	-	-
3/ Riverino agua abierta	3 120	2 446	2 536	2 394.1	3 833	3 994	5 165
3/ Riverino con vegetación	6 988	2 596	4 301	1 587.3	2 508	3 100	4 808

1/ Clases Inventario Nacional Forestal (2000-2001); 2/ Clases Humedales Costeros DUMAC (1993); 3/ Clases Clasificación de Humedales Interiores (2001).

Cuadro 6 Sitios de muestreo con registros positivos de aves acuáticas migratorias por carta temática

Numero de carta	Numero de sitios
F-142	5
F-1 436	3
F-145	7
G-1 411	22
G-145	10
G-148	6
G-14 912	3

La cobertura resultante correspondió únicamente a los humedales con avistamientos positivos, a los que se les generó un área de influencia (*buffer*) de 5 km.

En la Figura 5 se presenta, a manera de ejemplo, el *buffer* de 5 km generado alrededor de los puntos, sobrepuestos a una subescena en falso color de la imagen Landsat 27/43. Aquellos puntos que estuvieron a una distancia menor del diámetro definido como zona *buffer*, conformaron un área más grande que la determinada por el radio de 5 km, al traslaparse sus límites entre sí, convirtiéndose en una sola zona. El número que aparece al centro de la zona de influencia corresponde al campo de la base de datos denominado Control, el cual es el identificador único de cada humedal. Para extraer las estadísticas zonales de cada *buffer* respecto de las clases de usos del suelo, de vegetación y de tipos de humedales, se procedió a convertir cada cobertura vectorial en un formato raster, a fin de poder efectuar una tabulación cruzada de mapas. Los resultados estadísticos obtenidos para cada una de las zonas generadas por carta indicaron que las clases más importantes, en función de la proporción de cobertura en un área de 5 km alrededor de los humedales interiores y que tuvieron presencia de aves en un rango de 51 a 5 000 individuos, tanto al momento del levantamiento como por su registro histórico, fue, en primer término, la agricultura, seguida por los pastizales y los matorrales.

Esta situación fue similar para los tres casos en los que el número de aves acuáticas migratorias fue mayor a 5 000. A manera de síntesis, en el Cuadro 7 se presenta el porcentaje promedio de cobertura de la clase dominante obtenido en función del número de sitios con avistamientos positivos que tuvieron la misma clase. De los 56 sitios que reportaron la presencia de patos y gansos, la agricultura fue la clase dominante en 17 de ellos, seguida en segundo lugar por los matorrales con 16 sitios, mientras que en tercer lugar la clase pastizales.

El hecho de que la agricultura haya sido la clase de mayor recurrencia en la mayoría de las estadísticas zonales indica la relevancia que tienen estas áreas como zonas de alimentación para una diversidad de aves que pasa el invierno en estados del norte de México.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La identificación de humedales interiores naturales o artificiales es un primer paso para conocer el nivel de importancia que estos cuerpos de agua tienen en la conservación de la biodiversidad de la fauna silvestre del estado de Tamaulipas. A pesar del trabajo que diversas dependencias oficiales e instituciones no gubernamentales han realizado en lo relativo a la caracterización de los humedales de Tamaulipas, estos se han concentrado en zonas costeras y poco se ha hecho respecto a la enorme cantidad de humedales interiores que posee la entidad y que, como muestran los datos, son utilizados como áreas de refugio y alimentación por una variedad de aves. El proyecto ha conformado un marco de referencia sobre la necesidad de llevar a cabo programas de conservaciones de estos cuerpos de agua artificial, por su importancia para las poblaciones invernantes de aves acuáticas migratorias, lo cual es un hecho relativamente nuevo en términos históricos y culturales.

En este sentido, la relación de este grupo de trabajo con organizaciones no gubernamentales como DUMAC, dedicadas a la conservación y restauración de hábitats para aves migratorias, permitirá iniciar una segunda fase del proyecto en el que está implícita la selección de humedales potenciales a ser sujetos de rehabilitación o restauración, a través de un componente de cooperación con los dueños de predios donde estos humedales se localizan. El propósito es que a partir de la información generada en esta primera fase se desarrolle un programa piloto con propietarios dispuestos a implementar un manejo adecuado de estos hábitats para especies acuáticas migratorias. La idea es concentrarse en humedales localizados en predios privados, dado que se requiere no sólo la voluntad del propietario

sino también su apoyo económico y de estabilidad a este esfuerzo de conservación. Estos programas pilotos tendrán también como objetivos identificar factores que sirvan como incentivos para los propietarios de predios a manejar correctamente sus humedales en beneficio de la fauna silvestre del área, así como la posibilidad de implementar proyectos de educación ambiental utilizando estos humedales como laboratorios de práctica.

Debido a la irregular y dispersa distribución de estos cuerpos de agua en una extensión de casi 8 millones de hectáreas (la superficie del estado de Tamaulipas), la utilización de técnicas convencionales mediante fotografía aérea como estrategia para el desarrollo de un inventario base no es muy adecuada.

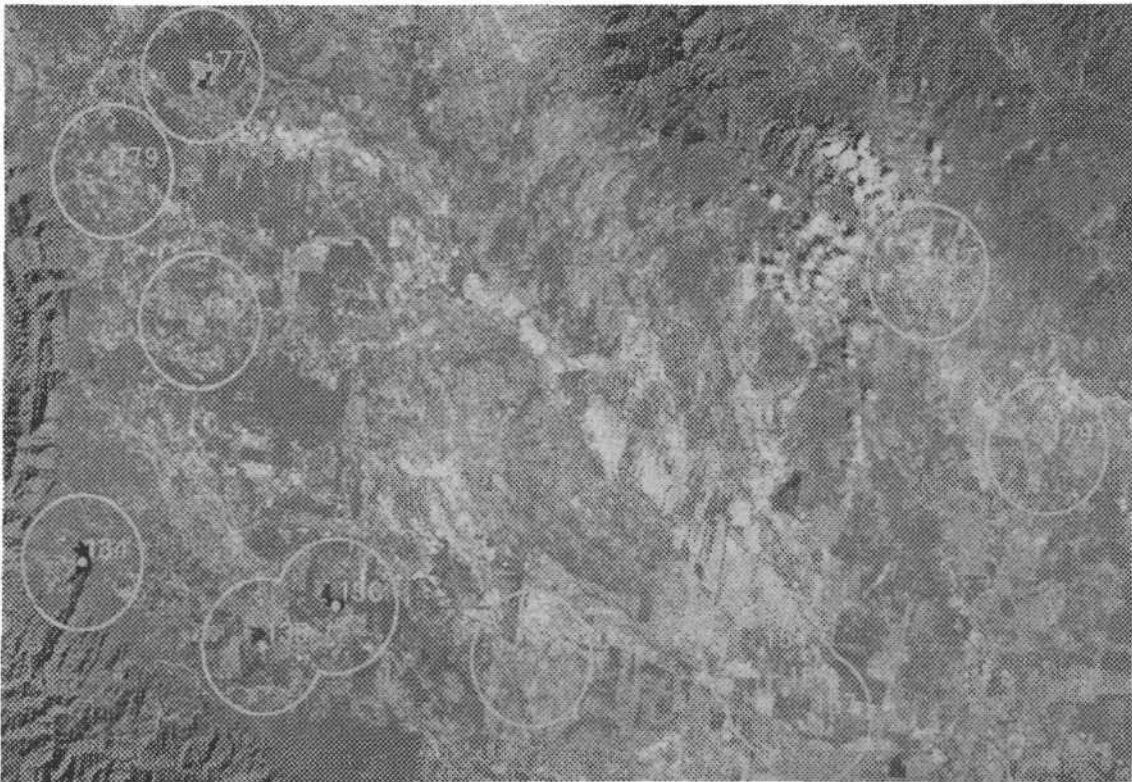


Figura 5. Zonas de influencia de 5 km alrededor de humedales interiores muestreados con registros positivos de presencia de aves acuáticas migratorias. Subescena Landsat 26/44.

Cuadro 7. Porcentajes promedio de clases dominantes resultantes del análisis estadístico de zonas de influencia (5 km) en función del número de sitios con la misma clase

Número de sitios por clase dominante	Promedio de cobertura dominante (%)	Clase de cobertura dominante
F-142		
3	59	Agricultura
2	37	Pastizales
F-1436		
2	90	Pastizales
1	35	Agua dulce natural emergente
F-145		
2	51	Pastizales
5	52	Agricultura
G-1411		
11	55	Matorral
8	59	Agricultura
1	38	Mezquitales
2	64	Pastizales
G-145		
2	48	Matorrales
1	49	Zona urbana
4	67	Pastizales
1	41	Mezquitales
1	49	Agua dulce artificial agua abierta
1	42	Agricultura
G-148		
3	37	Matorrales
2	53	Pastizales
1	40	Agua dulce artificial agua abierta
G-14912		
1	59	Zona urbana
2	52	Agricultura

Si bien la fotografía aérea funciona de manera ideal en zonas compactas y de buena extensión, ya que la relación costo/superficie se minimiza, la realización de vuelos de reconocimiento no puede ser aplicada con la misma eficiencia a una serie de pequeños almacenamientos de agua distribuidos por todo el territorio estatal. A esto hay que agregar que la mayoría de los humedales interiores son menores de una hectárea, es por ello que la utilización de imágenes de satélite es una alternativa viable y de bajo costo para escalas de trabajo 1:50 000 y 1:250 000. Más importante aún es el hecho de contar con un mecanismo para evaluar en tiempo y

espacio los efectos de un paisaje cambiante sobre las poblaciones de aves migratorias.

En este sentido, el proyecto permitió generar una base de datos inicial con la cual empezar a analizar la relación existente entre humedales interiores y el paisaje que lo rodea, como un medio para identificar factores biológicos y físicos que pueden incidir en la selección de un determinado sitio como zona de alimentación. De hecho, en casi la totalidad de los humedales que registraron presencia de aves acuáticas indicadoras, el porcentaje de cobertura en un radio de 5 km a partir del punto de muestreo, fue la agri-

cultura. Sin embargo, aunque ésta fue la clase dominante en los avistamientos de especies migratorias indicadoras, no debe asumirse la idea de que los humedales naturales no son capaces de sustentar a la vida silvestre, por carecer en sus alrededores de áreas agrícolas y por lo tanto de poca importancia para la conservación. Por el contrario, la riqueza biológica característica de los humedales naturales debe ser mantenida, ya que el uso de cuerpos de agua artificiales por las especies reportadas en los muestreos de campo tiene un claro componente de uso temporal y deben ser vistas como una oportunidad de subsistencia a los impactos que sobre el paisaje están ocasionando las actividades productivas.

La utilización de SIG y PR permitieron el manejo eficiente de la información digital cartográfica disponible, así como de los datos sobre humedales interiores que fueron obtenidos durante el desarrollo del proyecto, facilitando el análisis integrado entre sitios de muestreo, usos del suelo y tipos de vegetación y la información proveniente de las escenas Landsat ETM+.

A excepción de la región noreste del estado, identificada en la época húmeda, las imágenes restantes se ubicaron en la época seca, muchos humedales temporales muy dependientes del ciclo de lluvias no pudieron ser registrados al momento de la toma de vista del satélite. Por consiguiente, para evaluar la dinámica temporal de todo el complejo de humedales interiores, naturales y artificiales del estado de Tamaulipas, se requerirá del empleo de dos fechas de imágenes, obteniéndose los datos de la época seca y contrastándolos con los de la temporada de lluvias a manera de caracterizar sitios importantes para aves acuáticas migratorias. Aunque esta parte no fue abordada en esta fase del estudio, es importante destacar que desde el punto de vista de la disponibilidad de agua en el humedal durante todo el año, una fecha ubicada en la temporada de se-

quía es útil, ya que permite identificar con claridad aquellos cuerpos de agua que poseen una mayor capacidad para servir como áreas de refugio y mantenimiento para aves acuáticas migratorias.

REFERENCIAS

- ☞ Baret, F. (1991), "Vegetation canopy reflectance: factors of variation and application for agriculture", Belward, A. S. y C.R. Valenzuela (eds.), *Remote sensing and geographical system for resource management in developing countries*, ECSC, EEC, EAEC, The Netherlands.
- ☞ Cowardin, L. M., V. Carter, F. C. Golet y E. T. LaRore E. T. (1979), *Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States*, U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Reporte FWS/OBS-79-31.
- ☞ DUMAC (2002), Ducks Unlimited de México A. C. <http://www.dumac.org>
- ☞ ERDAS (1999), *Field Guide*, fifth edition, Earth Resource Data Analysis System Inc., Atlanta.
- ☞ Elvidge, C. D., T. Miura, W. T. Jansen, D. P. Groeneveld y J. Ray (1998), "Monitoring trends in wetland vegetation using a Landsat MSS Time Series", *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*, Ann Arbor Press.
- ☞ Guillemain, M., H. Fritz y P. Duncan (2002), "The importance of protected areas as nocturnal feeding grounds for dabbling ducks wintering in Western France", *Biological Conservation*, vol 3. no. 2, pp. 183-198.
- ☞ INF (2001), Inventario Forestal Nacional 2000-2001, Cartografía digital 1:250 000, Instituto de Geografía, UNAM, México (CD's).
- ☞ Hewitt, M. J. III (1990), "Synoptic inventory of riparian ecosystems: the utility of Landsat Thematic Mapper Data", *Forest Ecology and Management*, vol 33/34, pp. 605-620.
- ☞ Ibrahim, S. e I. Hashmin (1990), "Classification of mangrove forest by using 1:40 000 scale aerial photographs", *Forest Ecology and Management*, vol 33/34. pp. 583-592.

- 📖 Jackson, B. D. (1990), "Identification and inventory of the international forested-wetlands resource: Conference Summary", *Forest Ecology and Management*, vol 33/34, pp. 1-4.
- 📖 Lassoie, J. P. y L. E. Buck (1991), "Agroforestry in North America: new challenges and opportunities for integrated resource management", *The Second Conference on Agroforestry in North America*, The School of Natural Resources, University of Missouri, Columbia, pp. 1-19.
- 📖 Lillesand, T. M. y R. W. Kiefer (1987), *Remote sensing and image interpretation*, John Wiley & Sons, New York.
- 📖 Lund, H. G. (1990), "Inventory technology "Ebb Tides", "Flash Floods" and "Whirpools"", *Forest Ecology and Management*, vol 33/34, pp. 559-570.
- 📖 Nemani, R., L. Pierce, S. Running y L. Band (1993), "Forest ecosystem processes at the watershed scale: sensitivity to remotely-sensed leaf area index estimates", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, no. 13, pp. 2519-2534.
- 📖 Noss, R. F., E. T. Lahore y J. M. Scott (1995), "Endangered ecosystems of the United States: a preliminary assessment of loss and degradation", *Biological Repon 28*, U. S. Department of the Interior, National Biological Service, Washington.
- 📖 Pierce, R. A., D. T. Farrand y W. B. Kurtz (2001), "Projecting the bird community response resulting from the adoption of shelterbelt agroforestry practices in Eastern Nebraska", *Agroforestry Systems*, vol 3, no. 3, pp. 333-350.
- 📖 Ramsey III, E. W. (1998), "Radar remote sensing of wetlands", *Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and applications*, Ann Arbor Press, Michigan.
- 📖 Ratti, J. T., A. M. Rocklage, J. H. Giudice, E. O. Garton y D. P. Golner (2001), "Comparison of avian communities on restored and natural wetlands in North and South Dakota", *The Journal of Wildlife Management*, vol. 65, no. 4, pp. 676-684.
- 📖 Reynolds, R. E., T. L. Shaffer, R. W. Renner, W. E. Newton y B. D. Batt (2001), "Impact of the conservation reserve program on duck recruitment in the U. S. Parire Pothole region", *Journal of Wildlife Management*, vol 65, no. 4, pp. 765-780.
- 📖 Saunders, G. B. (1981), *Waterfowl and their wintering grounds in Mexico, 1937-64*, United States of the Interior, pp. 100-101.
- 📖 Thiam, A. y J. R. Eastman (1999), "Vegetation Indices", *Guide to GIS and Image Processing*, vol. 2, Clarks Lab. Clark University, Worcester, MA.
- 📖 Tiner, R. W. Jr. (1990), "Use of high-altitud aerial photography for inventorying forested wetlands in the United States", *Forest Ecology and Management*, vol. 33/34, pp. 593-604
- 📖 Warner, W. S. (1990), "A PC-based analytical stereoplotter for wetlands inventories: an efficient and economical photogrammetric instrument for field offices", *Forest Ecology and Management*, vol 33/34, pp. 573-582.
- 📖 Yépez Rincón, F. D. (2000), *Ecología invernal del ganso frente blanca en la región centro de Tamaulipas, México*, tesis de Licenciatura, UAM Agronomía y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Cd. Victoria, Tamaulipas, México.