

# **Ecohidrología de un humedal intermareal antropizado: un estudio de caso en la bahía de Samborombón (Argentina)**

*Federica Braga<sup>1</sup>, Eleonora Carol<sup>2</sup>, Luigi Tosi<sup>1</sup> y Eduardo Kruse<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Istituto di Scienze Marine, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Arsenale Tesa 104, Castello 2737/F, 30122 Venezia, Italy.

<sup>2</sup> Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata 64 n°3 La Plata, Argentina. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), eleocarol@fcnym.unlp.edu.ar

Mail de contacto: eleocarol@fcnym.unlp.edu.ar

## **RESUMEN**

En los humedales intermareales los procesos hidrológicos y ecológicos están íntimamente conectados, razón por la cual los cambios en la hidrología derivados de las actividades humanas pueden modificar los ecosistemas. En el humedal de la marisma del río Ajó la expansión ganadera dio lugar a la realización de numerosos terraplenes que cortan los canales limitando la propagación del flujo mareal. El objetivo del trabajo es analizar cómo los cambios hidrológicos ocasionados por el hombre en la marisma pueden afectar la ecohidrología del humedal en relación al desarrollo de la vegetación. Se estudiaron las características hidrológicas y ambientales en áreas naturales y antropizadas a partir de observaciones de campo y medición de variables hidrológicas. Para evaluar las modificaciones en la vegetación se efectuó una estimación de los cambios estacionales en la cantidad, calidad y desarrollo de la misma a partir del análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en imágenes Landsat. Los resultados obtenidos evidencian que cerca de un 18% del área de marisma está actualmente fuera del ciclo mareal debido a las alteraciones antrópicas. En estas zonas el funcionamiento hidrológico natural fue modificado afectando el desarrollo de la vegetación intermareal típica de este ambiente y en consecuencia la ecohidrología del humedal.

**Palabras clave:** humedal, marisma, vegetación intermareal.

## **ABSTRACT**

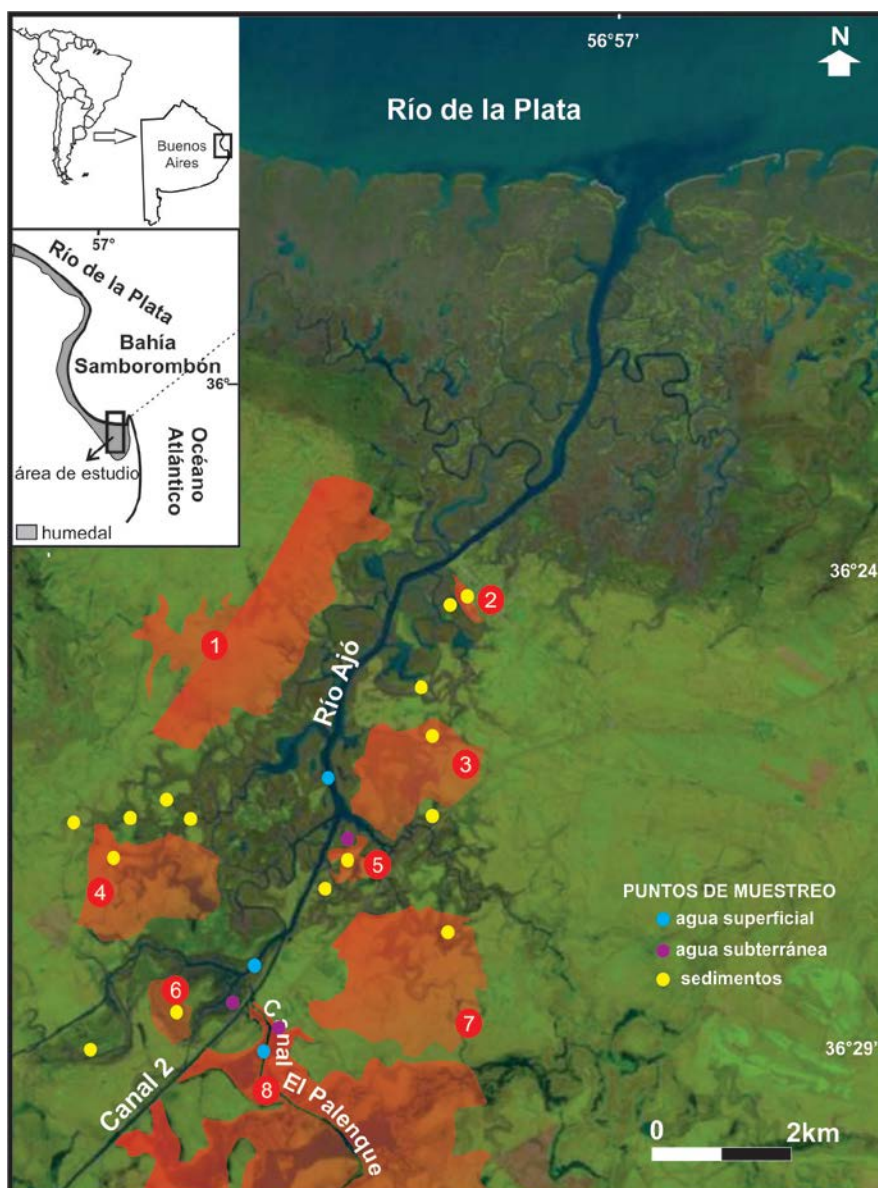
In intertidal wetlands, hydrological and ecological processes are intimately connected and therefore changes in hydrology resulting from climate and human activities can have both long and short term effects on ecosystems. In the marshland of Ajó river, many embankments were made for blocking the tidal flow and for increasing the cattle breeding areas. The aim of this work is to present evidence of hydrological man-made changes, which have occurred in the marsh, and to evaluate how such changes have affect wetland ecohydrology with a focus on vegetation conditions. Hydrological and ecological setting has been studied both in areas under natural condition and heavily affected by human activity with the aid of field observations and measurement of hydrologic variables. To assess the evolution of vegetation status, the seasonal changes in density and extension were valuated through the analysis of normalized difference vegetation index (NDVI) derived by Landsat satellite images. The results show that anthropogenic disturbances have modified the natural hydrological functioning of the marsh (approximately 18% of the wetland), affecting the expansion of the intertidal vegetation, typical of this environment, and consequently altering the wetland ecohydrology.

**Keywords:** wetlands, marsh, intertidal vegetation

# 1 INTRODUCCIÓN

La ecohidrología estudia la vinculación ambiental que existe entre los movimientos y almacenamientos de agua y la distribución, estructura y funcionamiento de los ecosistemas (Nuttle 2002). En los humedales intermareales, los procesos hidrológicos y ecológicos están íntimamente conectados y los cambios en la hidrología derivados del clima y las actividades humanas pueden tener efectos tanto a largo como a corto plazo sobre los ecosistemas costeros (Colvin et al. 2006).

Las marismas constituyen hábitats únicos para una amplia gama de organismos, son áreas de descanso y alimentación de aves migratorias y proporcionan importantes servicios ecosistémicos (Barbier et al 2011). Las condiciones ambientales de las marismas son controladas principalmente por la salinidad del suelo y los flujos mareales (Boorman 2003). La frecuencia y la duración de la inundación de las mareas, así como la salinidad del suelo, aumentan a medida que disminuye la elevación del terreno, y por lo tanto, el gradiente de elevación representa un gradiente ambiental de estrés causado por ambos factores. Esto determina la existencia de una fuerte zonación de las especies vegetales, en relación con su tolerancia a las inundaciones y la salinidad (Isacch et al. 2006).



**Figura 1** - Ubicación del área de estudio y puntos de medición y muestreo. Los círculos rojos identifican el número asignado a cada zona de la marisma modificada (cuya superficie se indica en color castaño rojizo).

En el sector sur de la Bahía de Samborombón (Argentina) se desarrolla un humedal intermareal asociado a la marisma del río Ajó (Fig.1), el cual fue designado sitio RAMSAR en 1997. Es un área poco poblada encontrándose en la marisma una pequeña localidad cuyas principales actividades económicas son la pesca y la ganadería. La expansión ganadera hacia el área intermareal del humedal dio a lugar a la realización de numerosos terraplenes que cortan canales de marea con el fin de evitar el ingreso del flujo mareal y en consecuencia disminuir la superficie inundada del campo y aumentar el área de pastoreo.

La hidrología de la marisma del río Ajó ha sido estudiada en detalle en varios trabajos (Carol et al. 2009, Carol et al. 2011, Carol et al. 2012), sin embargo, no existen antecedentes que analicen la relación entre la hidrología y las comunidades vegetales del humedal. El objetivo del trabajo es analizar cómo los cambios en el comportamiento hidrológico de la marisma ocasionados por las actividades antrópicas afectan la ecoidrología del humedal en relación al desarrollo de la vegetación.

## **2 ÁREA DE ESTUDIO**

La hidrología de la marisma está regulada principalmente por el aporte de flujos mareales que ingresan desde el estuario del Río de la Plata, y en menor medida por la descarga subterránea, las precipitaciones y el drenaje continental de los canales 2 y El Palenque. La altura topográfica promedio de la marisma es de 0,50 m snm en la costa de la bahía y alcanza valores cercanos a 1,70 m snm en los sectores más continentales. Las áreas naturales son inundadas periódicamente por la pleamar que ingresa desde el estuario del Río de la Plata que tiene un régimen micromareal semidiurno con desigualdades diurnas. La onda de marea se propaga por el río Ajó y canales de marea, registrándose dentro de la marisma oscilaciones en el nivel de agua superficial que varían entre -1,07 y 1,20 m snm. En mareas extraordinarias el nivel de agua superficial alcanza los 2,00 msnm e inunda la totalidad de la marisma. El agua subterránea tiene un flujo regional hacia la bahía y descarga localmente en los canales de marea y el río Ajó en marea baja, mientras que durante la pleamar existe un aporte de agua superficial hacia la napa subterránea (Carol et al. 2011). Debido a que la salinidad promedio en esta zona del estuario es de 20 g/L y la del drenaje que descarga al río Ajó es inferior a 1,5 g/L la propagación de la onda de marea en la marisma produce que en ella existan variaciones periódicas en el contenido salino de la columna de agua superficial y subterránea (Carol et al. 2012).

En las áreas de marisma fuera del ciclo mareal por la acción antrópica como consecuencia de obras del hombre (camino, terraplenes, canales), los niveles y salinidad en el agua superficial y subterránea no tienen dependencia de los flujos mareales. La relación agua superficial – subterránea no varía y la salinidad es homogénea en toda la columna de agua (Carol et al. 2012).

## **3 METODOLOGÍA**

Se llevó a cabo un reconocimiento del área de marisma y de las obras de ingeniería realizadas en ella se realizó a partir de la interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas y trabajos de campo con el fin de delimitar áreas de marisma afectadas hidrológicamente por la acción antrópica.

Se evaluaron las características hidrológicas y ambientales de la marisma en áreas naturales y antropizadas a partir de observaciones de campo, mediciones de niveles y salinidad del agua superficial y subterránea y muestreos de los sedimentos superficiales para la determinación del contenido de cloruro (Fig. 1). Las mediciones hidrométricas y freáticas se realizaron utilizando sondas manuales y sensores de registro continuo. Las mediciones de salinidad se realizaron con una sonda multinivel. Las muestras de sedimento se extrajeron entre 0-20 cm de profundidad y las determinaciones de cloruro en sedimentos se realizaron por el método EPA9253. En este trabajo los datos analizados corresponden a una recopilación de registros de una red de monitoreo periódico que mantiene el grupo de trabajo en el área desde 2005 y en los resultados se describen los valores más representativos.

En las áreas naturales y modificadas de la marisma se realizaron reconocimientos de campo para determinar la distribución espacial y temporal de las especies vegetales dominantes en cada zona. Un análisis multitemporal se llevó a cabo en imágenes Landsat del año 2000, seleccionándose por ser las de mayor disponibilidad y calidad. Las imágenes utilizadas fueron adquiridas de sensores TM y ETM, montados en las plataformas Landsat 5 y Landsat 7 respectivamente. Han sido descargadas del archivo EROS del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Earth Resources Observación y Ciencia, United States Geological Survey, <http://glovis.usgs.gov>), con una resolución espacial de 30 m, coordenadas en datum WGS84 y proyección UTM. Las imágenes Landsat fueron corregidas radiométricamente según Chander et al. (2009) y posteriormente se realizó una corrección atmosférica con el código 6S de transferencia radiativa (Vermote et al., 1997).

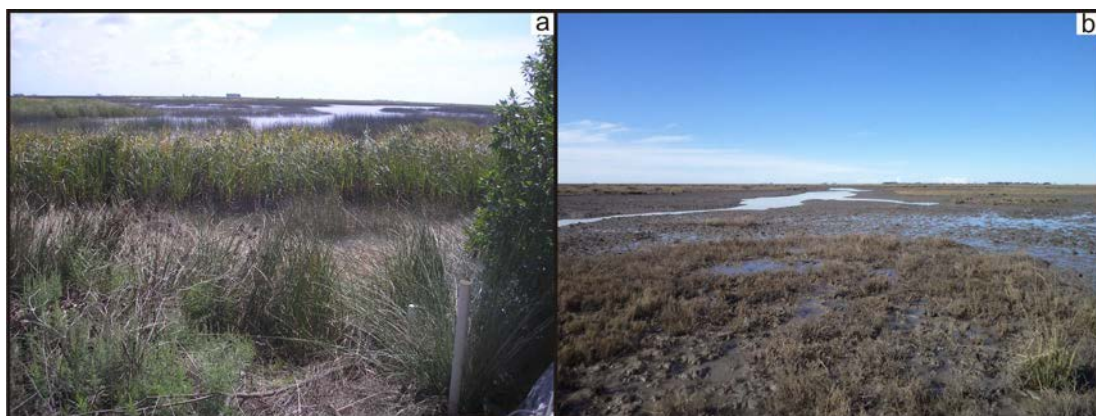
Para evaluar las modificaciones en la ecología del humedal se efectuó una estimación de los cambios estacionales en la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación de la marisma a partir del análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). El cálculo del NDVI se efectuó para cada imagen considerando la banda roja (RED) e infrarrojo cercano (NIR) (Rouse et al., 1973) usando el software ENVI (Exelis VIS) según la ecuación (1).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (1)$$

Se debe tener en cuenta que la vegetación vigorosa tiene una alta reflectancia en el infrarrojo cercano, mientras que las especies vegetales bajo estrés producen menos clorofila y por tanto se reflejan más en la banda roja. Así se obtiene que los valores positivos de NDVI (alta reflectancia en el NIR y baja en RED) están asociados a zonas con vegetación, mientras que los valores negativos (alta reflectancia en RED y baja en NIR) representan lagos, ríos, arroyos y cursos de agua en general, las nubes o las zonas de nieve. Por su parte, valores cercanos a cero ( $NIR \approx RED$ ) en general evidencian condiciones de ausencia de vegetación, tales como suelo desnudo o afloramiento de rocas (Lillesand y Kiefer 1994).

#### 4 RESULTADOS

La inundación del área de marisma durante la pleamar produce variaciones periódicas en los niveles y salinidad del agua superficial y subterránea que son vitales para las especies vegetales del humedal intermareal. Estos flujos también regulan la humedad y salinidad del suelo, el cual se encuentra generalmente saturado en agua y presenta contenidos en cloruros que varía entre 1.985 y 6.300 mg/kg. Bajo estas condiciones ambientales entre mediados de la primavera y el verano se desarrolla una densa vegetación compuestas por *Spartina alterniflora*, *Spartina densiflora*, *Salicornia ambigua*, *Juncus acutus* y *Zizaniopsis bonariensis*, entre otras; mientras que en otoño la vegetación se reduce prevaleciendo durante el invierno un suelo desnudo en toda la zona intermareal (Fig. 2).



**Figura 2** - Fotografía de la marisma natural en (a) verano y (b) invierno.

Tanto los terraplenes como los caminos constituyen obras de ingeniería de escasa envergadura que modifican el funcionamiento hidrológico del humedal al dejar a sectores de la marisma fuera del ciclo mareal (Fig. 3). El análisis de las imágenes satelitales y los relevamientos de campo permitieron reconocer ocho áreas de la marisma que se encuentra actualmente fuera del ciclo mareal (Fig. 1). El área 1 está afectada por terraplenes que cortan canales de marea en el sector sureste y por la traza de un camino en el sector sudoeste. El área 2 comprende una pequeña zona de la localidad de General Lavalle terraplenada para ganar terrenos destinados a urbanización. Las áreas 3, 4, 5, 6, y 7 son sitios de la marisma terraplenados que se utilizan para la cría de ganado. El área 8 corresponde a un sector de la marisma que queda aislado del ciclo mareal por las compuertas de los canales 2 y El Palenque. Todas estas obras pueden observarse en las fotografías aéreas de 1984, lo cual evidencia la antigüedad de las mismas. En la tabla 1 se observa la superficie que abarca cada área modificada y el porcentaje que esta representa respecto del área total de la marisma 270,4 km<sup>2</sup>.

**Tabla 1** – Superficie de las áreas modificadas y porcentaje que representan respecto del área total de marisma.

	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6	Area 7	Area 8
Superficie en km <sup>2</sup>	11,9	0,3	3,5	5,5	0,5	1,6	8,3	15,9
Porcentaje modificado	4,4	0,1	1,3	2,1	0,2	0,6	3,1	5,9

Los principales cambios hidrológicos que ocasionan estas obras se deben a que el agua superficial procedente del estuario no inunda el suelo de la marisma y en consecuencia el acuífero freático no recibe el aporte de agua de la marea. En estas zonas de la marisma que están actualmente fuera del ciclo mareal la vegetación se caracteriza por la presencia de pastizales salinos en donde dominan (en cerca del 70%) especies de *Distichlis spicata* o *Distichlis scoparia* asociadas a suelos arcillosos que contienen gran cantidad de sales solubles. A diferencia de la marisma natural, el suelo en estas zonas alteradas está siempre cubierto por vegetación, la cual tiene mayor desarrollo durante los meses de verano (Fig. 3).



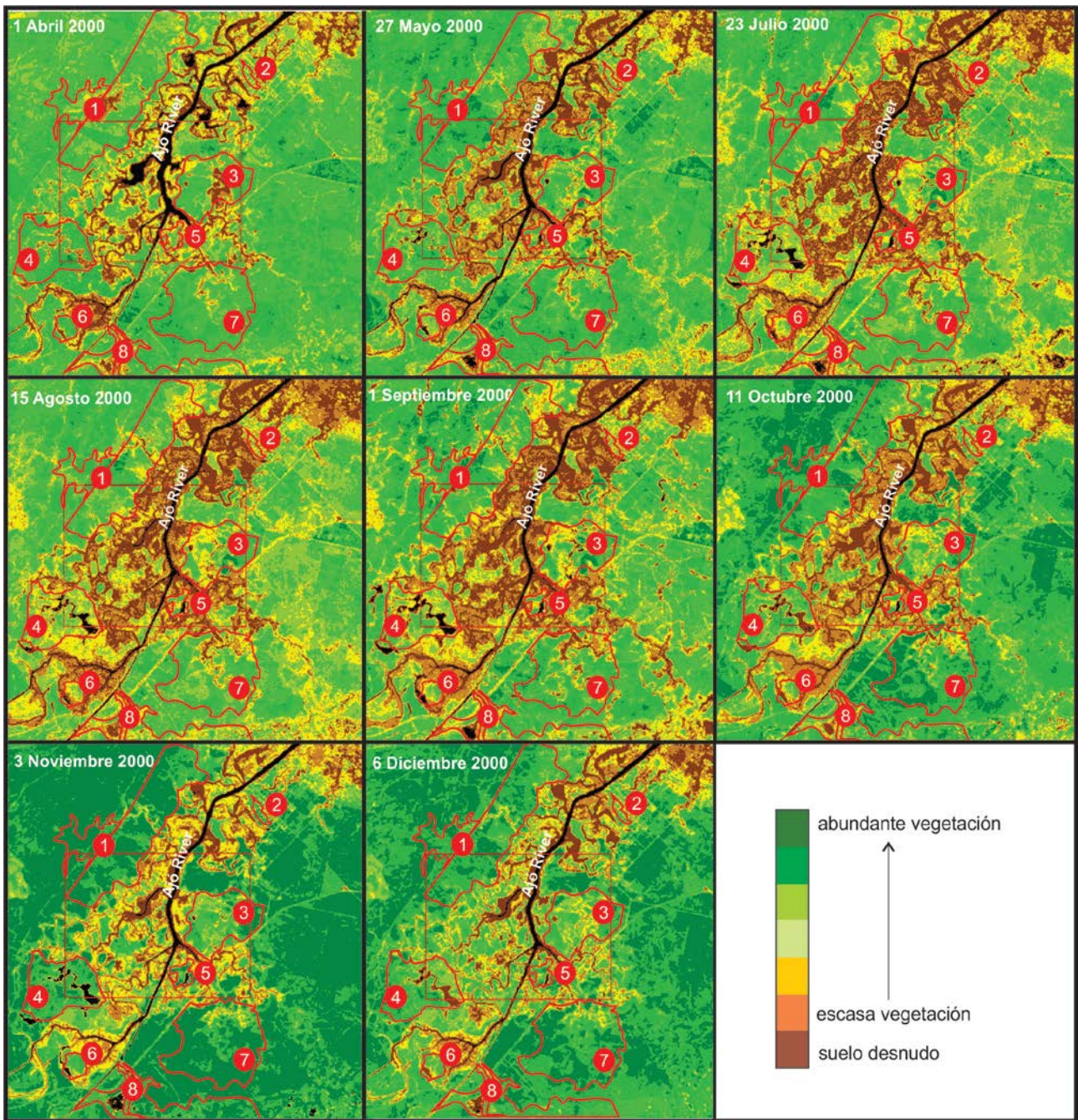
**Figura 3** -Fotografía de la marisma modificada en (a) verano y (b) invierno.

El contraste en la vegetación que existe durante los meses de invierno entre la marisma natural (donde predomina el suelo desnudo) y la alterada (donde existe una vegetación de pastizales poco densa) permite verificar en las imágenes satelitales a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) las áreas modificadas anteriormente reconocidas. El análisis del NDVI con las imágenes Landsat disponibles para el año 2000 (Fig. 4) muestra cómo el iniciarse el otoño (imagen de abril) comienza a aumentar la superficie de la marisma con suelo desnudo,

indicada en tonalidades marrones, la cual alcanza su mayor extensión en los meses de invierno (julio y agosto). Nótese que en las áreas que actualmente se encuentran fuera del ciclo mareal la vegetación solo disminuye de densidad casi sin existir zonas con suelo desnudo. Al iniciarse la primavera (septiembre) comienza a crecer la vegetación en la marisma natural y las zonas con suelo desnudo disminuyen reduciéndose a pequeños parches en los meses de verano (diciembre).

Dos características hidrológicas existentes en las zonas de marisma alterada también pueden ser apreciadas en las imágenes de la figura 4, una asociada a las precipitaciones y la otra a los eventos de marea extraordinaria. En las áreas 4, 5 y 6 los terraplenes aíslan del flujo mareal a canales de marea formando zonas deprimidas de baja permeabilidad donde en periodos húmedos se acumula el agua de la lluvia. Algo similar ocurre en el área 8, producto de las compuertas en los canales. La acumulación de agua en estas zonas puede apreciarse en las imágenes correspondientes a los meses mayo, septiembre y noviembre (Fig. 4), en coincidencia con precipitaciones por encima de 80 mm ocurridas en el mes anterior. Debido a la baja permeabilidad de los sedimentos y la imposibilidad de drenaje, el agua permanece acumulada en superficie por varias semanas (Fig. 5). Con el tiempo, el agua de lluvia va lavando las sales del suelo, registrándose en estos sectores contenidos de cloruros entre 1.252 y 1.578 mg/kg. En estas zonas la salinidad del agua y de los sedimentos tiende a ser menor que en la marisma natural y en los lugares comúnmente anegados por la lluvia es habitual la presencia de especies vegetales de *Solanum glaucophyllum* y *Cestrum parquii* (Fig. 5).

En las mismas áreas, puede ocurrir que durante las mareas extraordinarias o eventos de tormenta, la altura de la pleamar sobrepase la cota de los terraplenes. Luego en bajamar, los terraplenes funcionan como barreras que impiden el drenaje natural hacia la bahía y el agua mareal queda acumulada en superficie por tiempos prolongados. Esta característica puede apreciarse en las imágenes de los meses de julio y agosto de 2000 donde luego de una pleamar extraordinaria se observa agua en superficie acumulada (en tonalidades negras). Cabe destacar que en estas imágenes se descarta la posible acumulación de agua de lluvia debido a que en los 50 días anteriores a las imágenes, los registros de precipitación no superan los 40 mm. Eventos de marea extraordinaria ocurren entre cuatro y ocho veces al año. Debido a que el agua del flujo mareal es salina de tipo clorurada sódica los procesos de evaporación producen un aumento en la concentración de cloruros en el sedimento. Determinaciones de cloruro en sedimento realizadas una semana después de un evento de pleamar extraordinaria registraron valores de hasta 15.775 mg/kg, observándose precipitados de halita en estos sitios.



**Figura 4-** Análisis del NDVI en imágenes Landsat del año 2000.



**Figura 5** - (a) Fotografía de una zona de la marisma con terraplenes indicando el contraste de salinidad del agua en superficie de un lado y del otro del terraplén. (b) Marisma actualmente fuera del ciclo mareal anegada por agua de lluvia.

## 5 CONCLUSIONES

El análisis del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) en imágenes Landsat seriadas, junto con relevamientos de campo y mediciones de variables hidrológicas permitieron reconocer que en aproximadamente el 18 % del área de marisma que conforma el humedal, las condiciones ecohidrológicas han sido afectadas por la acción antrópica. Los terraplenes de caminos y contención del flujo mareal modifican el funcionamiento hidrológico natural de la marisma afectando el desarrollo de la vegetación intermareal típica de este ambiente.

Dado que la mayoría de las obras de ingeniería tienen más de 40 años de antigüedad, las áreas del humedal afectadas tienen actualmente características ecohidrológicas adaptadas a las nuevas condiciones. En virtud de la importancia que tiene el humedal estudiado como reserva natural, es de relevancia considerar la existencia de estas modificaciones al momento de planificar nuevas obras, a fin de minimizar los impactos negativos que las mismas puedan ocasionar a la hidrología y ambientes bióticos de la marisma.

### Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en el ámbito del Acuerdo de Cooperación Científica entre el CONICET (Argentina) – CNR (Italia), Programa bianual 2013 – 2014 para el proyecto “Agua dulce y saladas en áreas costeras de alto valor socioeconómico: de la evaluación de la interacción actual con metodologías hidrológicas, hidrogeológicas e hidrogeoquímicas a la simulación de los efectos previstos del cambio climático”.

Las imágenes satelitales fueron obtenidas del U.S. Geological Survey's, Earth Resources Observation and Science (EROS) Center.

### REFERENCIAS

Barbier E.B., Hacker S.D., Kennedy C., Koch E.W., Stier A.C., Silliman B.R. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol Monogr* 81:169–193.

- Boorman L. (2003) Saltmarsh review: an overview of coastal saltmarshes, their dynamic and sensitivity characteristics for conservation and management. JNCC, Peterborough, p 132.
- Carol, E., Dragani, W., Kruse, E., Pousa, J. 2012. Surface water and groundwater characteristics in the wetlands of the Ajó River (Argentina). *Continental Shelf Research*, 49: 25–33.
- Carol, E., Kruse, E. and Pousa, J. 2011. Influence of the geologic and geomorphologic characteristics and of crab burrows on the interrelation between surface water and groundwater in an estuarine coastal wetland. *Journal of Hydrology*, 403: 234–241.
- Carol, E., Kruse, E., Mas Pla, J. 2009. Hydrochemical and isotopic evidence of ground water salinization processes on the coastal plain of Samborombón Bay, Argentina. *Journal of Hydrology*, 365: 335–345.
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote sensing of environment*, 113: 893-903.
- Colvin C., Eamus D., Cook P., Hatton T. 2006. Ecohydrology: vegetation function, water and resource management. CSIRO Publishing, p 361.
- Isacch J.P., Costa C.S.B., Rodríguez-Gallego L., Conde D., Escapa M., Gagliardini D.A., Iribarne O.O. (2006) Distribution of saltmarsh plant communities associated with environmental factors along a latitudinal gradient on the southwest Atlantic coast. *Journal of Biogeography* 33:888–900.
- Lillesand T.M. & Kiefer R.W. 1994. Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, New York, p 768.
- Nuttle W. 2002. Is ecohydrology one idea or many? *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 47: 805 – 807.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351, 309-317.
- Vermote, E. F., Tanré, D., Deuze, J. L., Herman, M., & Morcette, J. J. 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35: 675–686.