SENSORAMIENTO REMOTO APLICADO A LA EVALUACIÓN DE CAMBIOS AMBIENTALES EN CORDONES LITORALES ASOCIADOS AL HUMEDAL DE LA BAHÍA SAMBOROMBÓN

Ali Santoro V.[a], Borzi G.[b,c], Tanjal C.[b,c] y Carol E.[b,c]

[a]*Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, UNSAM Universidad Nacional de San Martín, ARGENTINA*
[b]*Facultad de Ciencias Naturales y Museo, FCNyM Universidad Nacional de La Plata, ARGENTINA*
[c]*Centro de Investigaciones Geológicas, CIG, CONICET - UNLP, ARGENTINA*

e-mail: valisantoro@unsam.edu.ar

RESUMEN

El humedal de Bahía Samborombón localizado al este de la provincia de Buenos Aires constituye un sitio Ramsar desde 1997. En el mismo se agrupan sistemas de paisajes asociados a marismas activas, cordones litorales y antiguas planicies de marea. Dentro de estos los cordones litorales compuestos por conchillas y arenas, sustentan a relictos de bosques nativos compuestos principalmente por Celtis tala. Además, los cordones albergan lentes de agua dulce las cuales constituyen el principal recurso hídrico de la región. El objetivo del trabajo fue realizar un análisis multitemporal mediante sensoramiento remoto utilizando herramientas de libre acceso y de rápido procesamiento con el fin de evaluar los cambios en las características ambientales que ocurrieron en el humedal producto de la actividad minera y que afectaron a los bosques nativos y recursos hídricos. Para esto a partir del modelo digital del terreno TANDEM y las cartas topográficas de más de 40 años de antigüedad se reconocieron las áreas de cordones litorales. Posteriormente se analizaron series temporales de imágenes satelitales para identificar el avance temporal de la actividad minera y se realizaron relevamientos de campo a fin de reconocer cordones litorales donde se preserva el bosque nativo de talas, la presencia de bosques alóctonos, canteras y áreas desprovistas de arbolado. Posteriormente mediante la utilización de la herramienta Google Earth Engine se procedió a la obtención y análisis de firmas espectrales de los sitios observados a campo. Durante los relevamientos también se efectuaron mediciones de la salinidad del agua y profundidad de niveles freáticos en las lentes de agua dulce. Los resultados obtenidos permitieron evaluar los cambios en las características ambientales que ha producido la actividad minera en los últimos 40 años los cuales han reducido considerablemente las áreas de bosques nativos, así como también ha afectado a los recursos hídricos de la región.

Palabras Clave: Sensores remotos, Google Earth Engine, Bosques nativos, Recursos hídricos.

INTRODUCCIÓN

El humedal de Bahía Samborombón localizado al este de la provincia de Buenos Aires constituye un sitio Ramsar desde 1997. En este sector se agrupan sistemas de paisajes asociados a marismas activas, antiguas planicies de marea y cordones litorales. Los cordones litorales poseen una orientación subparalela a la línea de costa y se componen de conchillas y arenas donde se desarrollan suelos bien drenados que sustentan al bosque nativo de tala que agrupa especies de *Celtis tala*, *Scutia buxifolia*, *Sambucus australis*,

Schinus longifolius y *Jodina rhombifolia*, entre otras. Pese a ser uno de los únicos bosques nativos de la provincia, ha evidenciado un importante retroceso durante el siglo XX, inicialmente por su uso como leña y posteriormente a la explotación minera de conchilla (Parodi, 1940; Tanjal et al., 2017; Elizalde, 2020). La problemática del retroceso de este bosque nativo radica, no sólo en que se ven afectadas las especies autóctonas que dependen de él, sino también en que no existe una recuperación del mismo luego de la explotación minera (Arturi y Goya, 2004). Otra problemática, la constituye la afectación del recurso hídrico ya que en los cordones litorales se alojan lentes de agua dulce, las cuales son el principal recurso hídrico para consumo humano de la región (Sala et al., 1978; Carol, 2015). Se destaca que el análisis de la pérdida de este bosque ha sido abordado desde distintas disciplinas, observando que la utilización de herramientas de teledetección es de gran importancia para estos estudios. Pese a esto, la identificación, clasificación y cuantificación, son tareas que pueden demandar mucho tiempo, observando que las series temporales analizadas se limitan sólo a algunos estadios puntuales (Cellone et al., 2016; Borzi, 2018; Elizalde, 2020). En este sentido, es necesario utilizar herramientas capaces de evaluar cambios ambientales ocurridos en los cordones litorales del humedal. Por esta razón, el objetivo del trabajo fue realizar un análisis multitemporal mediante sensoramiento remoto utilizando herramientas de libre acceso y de rápido procesamiento con el fin de evaluar cambios en las características ambientales que ocurrieron en el humedal debido a la actividad minera que afectaron a los bosques nativos y recursos hídricos. Google Earth Engine es una plataforma basada en la nube que, a través de algoritmos, procesa de manera rápida gran cantidad de información geoespacial. Es decir, se utilizan las capacidades computacionales de Google para abordar diversos problemas socioambientales de alto impacto como la deforestación. La plataforma cuenta con un amplio catálogo de datos que se encuentran públicamente disponibles. En el catálogo podemos encontrar la colección histórica de imágenes de Landsat, Setinel, Modis, etc. (Gorelick et al., 2017).

MÉTODOLOGIA

Inicialmente se utilizaron cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) de más de 40 años de antigüedad juntamente con un modelo digital del terreno (DEM) TanDEM (EOC Geoservice, 2019), donde se reconocieron las áreas de cordones litorales. Seguidamente, se realizaron relevamientos de campo a fin de reconocer cordones litorales donde se preserva el bosque nativo de talas, la presencia de bosques alóctonos, canteras y áreas desprovistas de arbolado. Durante el trabajo de campo se procedió a la medición de salinidad del agua y profundidad de niveles freáticos en las lentes de agua dulce alojada en los cordones litorales.

Luego de identificar los distintos sectores del área de estudio, se procedió a la extracción y análisis de las firmas espectrales de las principales coberturas utilizando una imagen de Landsat 8 OLI del verano del 2020. Realizada esta tarea se continuó con el análisis de series multitemporales de imágenes satelitales Landsat para identificar el avance temporal de la actividad minera. Este análisis se realizó mediante la utilización de la herramienta Google Earth Engine, a través de la obtención y análisis de firmas temporales de NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) para los sitios observados en campo. Para analizar la serie temporal se utilizaron imágenes Landsat 5 TM y 8 OLI calibradas a reflectancia en superficie abarcando un período de 34 años, desde 1986 hasta el 2020. Inicialmente fueron seleccionadas imágenes de verano y de invierno con un porcentaje de cobertura de nubes menor al 10 % conformando mapas de NDVI que condensan el

periodo de años abarcado y se obtuvo el valor promedio de NDVI para los meses de verano e invierno. Por otro lado, se realizaron gráficos bivariados en los cuales se analizó la firma temporal de NDVI para cada una de las áreas de detalle relevadas en campo. Este análisis fue complementado con la visualización de imágenes satelitales Landsat y con fotografías aéreas de la década del 80'.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el área de humedal las unidades del paisaje asociadas a la antigua llanura de marea y a la marisma constituyen zonas deprimidas donde las cotas rara vez superan los 3 msnm. Por su parte, la unidad del paisaje correspondiente a los cordones litorales constituye una geoforma positiva cuyas cotas pueden alcanzar los 6 msnm, permitiendo esta característica su rápida identificación a partir del análisis de las cartas topográficas y el modelo digital del terreno (Fig. 1). Los cordones litorales se caracterizan también por presentar suelos bien drenados y agua subterránea de baja salinidad (Fig. 1) característica también resalta en contraste con las otras unidades del paisaje del humedal donde domina el agua salina (Carol, 2015).

Estas características distintivas determinan ambientalmente que los cordones litorales adquieren relevancia por alojar lentes de agua dulce y por ser la unidad del paisaje del humedal que conforma el sustrato del monte nativo de talas. No obstante, el análisis temporal de imágenes satelitales evidencia que este sustrato ha sido paulatinamente degrado por la explotación minera, la cual extrae el bosque nativo decapitando los suelos en que estos se desarrollan. Posterior a la explotación, el paisaje de los cordones litorales se presenta como canteras donde aflora el nivel freático, o como zonas planas en donde se siembran pasturas o queda el material de descarte desprovisto de vegetación. Esto ha ocasionado una pérdida de la morfología positiva de los cordones litorales. De esta manera zonas de cordones litorales delimitados a partir de las cartas topográficas hace 40 años (polígono con rayas indicado en la Fig. 1) se observan como zonas deprimidas en los DEM actuales.

La pérdida del bosque nativo por las explotaciones mineras es evidenciada en el análisis comparativo de imágenes satelitales seriadas desde el año 1986, fotografías aéreas de la década del 80 y mapeos en las cartas topográficas confeccionadas en la década de 1960. En este sentido, se destaca que el bosque nativo de talas se encuentra en la actualidad restringido sólo a algunos sectores. Durante los relevamientos de campo, escasas estancias presentaban el monte nativo de talas, siendo el más destacable el de la estancia La Petrona (Fig. 1). Asimismo, dicha estancia posee, como en la mayoría de las estancias del área de estudio, zonas de cordones litorales desprovistas de arbolado y sectores dedicados a la plantación de especies alóctonas. Esta situación se ve agravada debido a que donde se desarrolla el monte de tala, también se reconoce la presencia de especies exóticas, reduciendo aún más al monte nativo.

En base al análisis precedente y al trabajo de campo, se procedió a obtener las firmas espectrales de las distintas áreas observadas mediante imágenes Landsat, obteniendo así las firmas espectrales del monte de talas, monte invadido de especies exóticas, cordón litoral con árboles alóctonos como eucalipto, cordón litoral previamente explotado y cubierto con pastizal, y cordón conchil explotado dejando una cantera con agua (Fig. 2). A partir de estas se observa que bien las coberturas vegetales poseen el patrón característico de la vegetación, los picos de la Banda 5 poseen distintas intensidades en cada cobertura. Por su parte, la cantera ocupada por agua registra un patrón característico del agua.

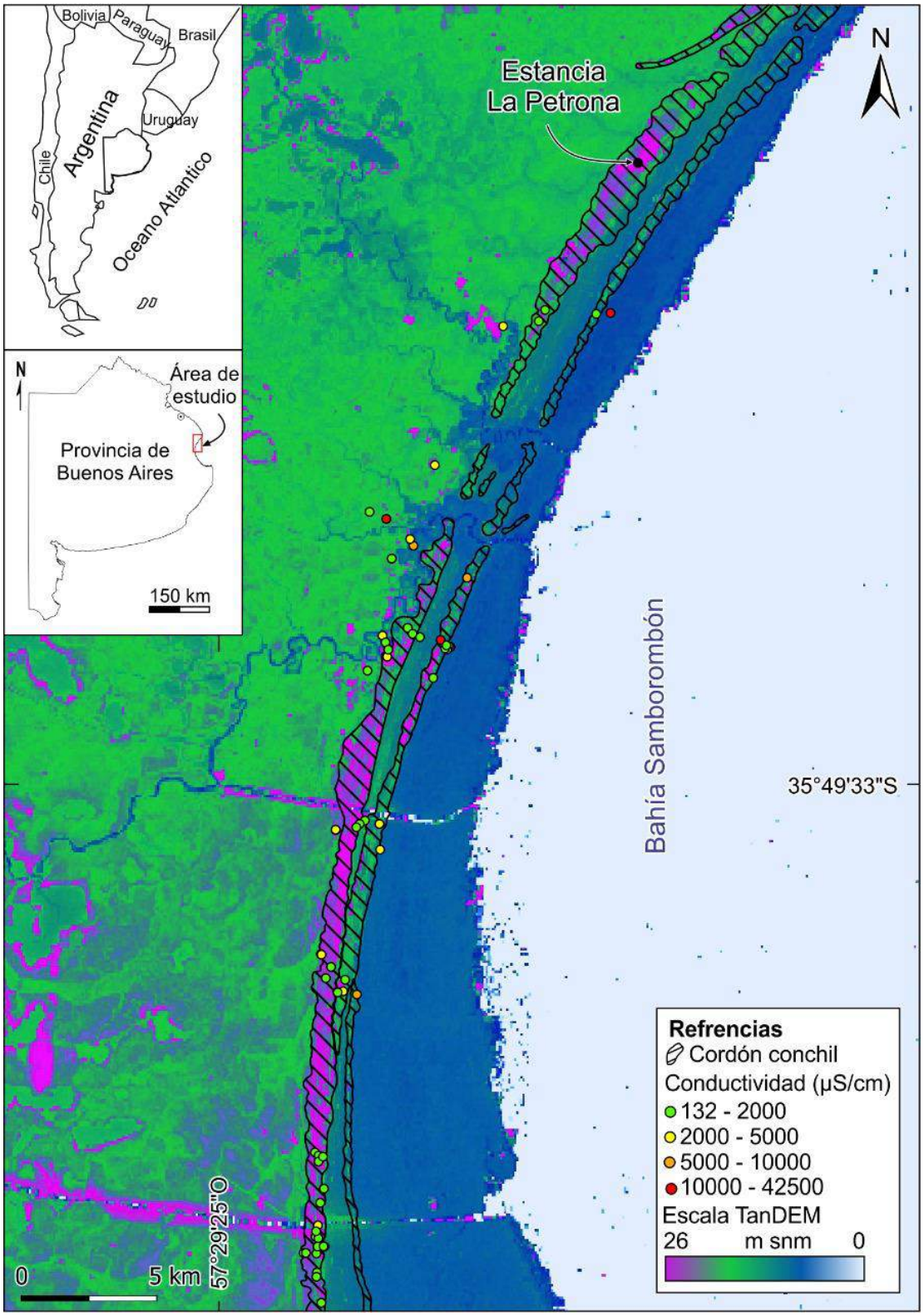

Figura 1. Mediciones de conductividad del acuífero freático y cordones de conchilla mapeados. Base de la imagen TanDEM.

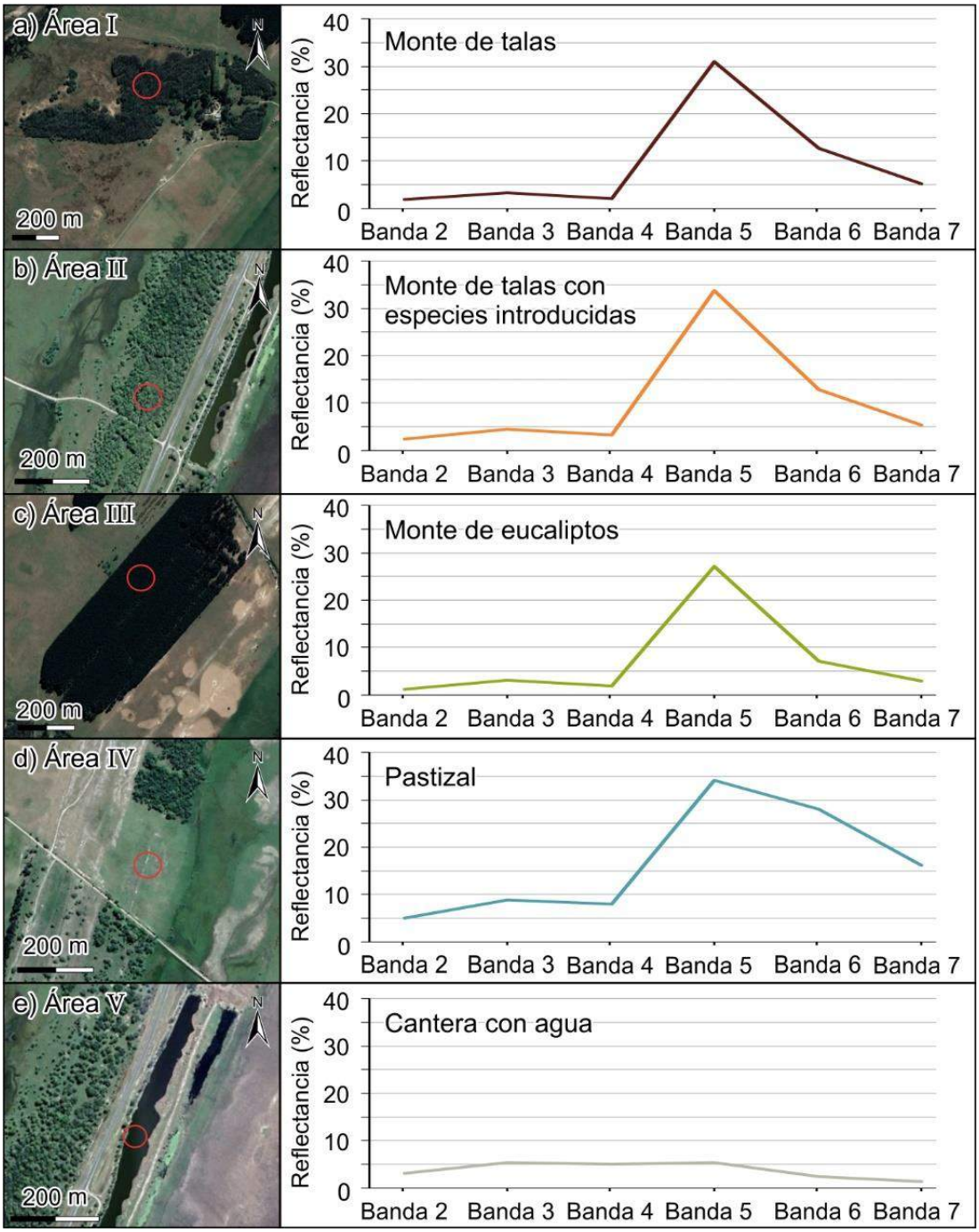

Figura 2. Firmas espectrales de distintas coberturas sobre los cordones litorales obtenidas mediante la serie Landsat 8. **a.** monte de talas. **b.** monte de talas invadido. **c.** monte de eucalipto. **d.** pastizal. **e.** cantera con presencia de agua.

Se procesaron un total de 659 imágenes Landsat con una cobertura de nubes menor o igual al 10%. La variación temporal en los valores de NDVI fue compilada en 2 mapas, los que concentran la información de los últimos 36 años. Dichos mapas se corresponden con imágenes de verano e invierno (Fig. 3 a y b respectivamente). En el mapa de verano se distinguen de manera restringida áreas con montes nativos de talas (coloración bordo

en la Fig. 3a) y montes de talas y especies arbóreas introducidas (coloración naranja con escasos pixeles bordo en la Fig. 3a). Por otro lado, en el mapa de invierno pueden identificarse zonas en donde han sido introducidos montes perennes como eucaliptos (coloración naranja en Fig. 3 b). La cobertura de pastizales fue más notoria en verano, y se encontraron en una posición topográfica relativa más baja relacionado a los antiguos canales de marea (coloración naranja en la Fig. 3a) y en la planicie de marea que está topográficamente más elevada (coloración verde en la Fig. 3a). Respecto a la identificación de pastizales en el cordón conchil, se observó que la cobertura del sustrato fue variable, con sectores donde hay amplio desarrollo del pastizal (coloración celeste en la Fig. 3a) y sectores con sustrato desnudo o con escasa cobertura vegetal (coloración violeta en la Fig. 3a). Por último, la presencia de agua fue indiscutible por el bajo valor de NDVI, rasgo que caracteriza a las canteras principalmente en verano (coloración gris en Fig. 3 a).

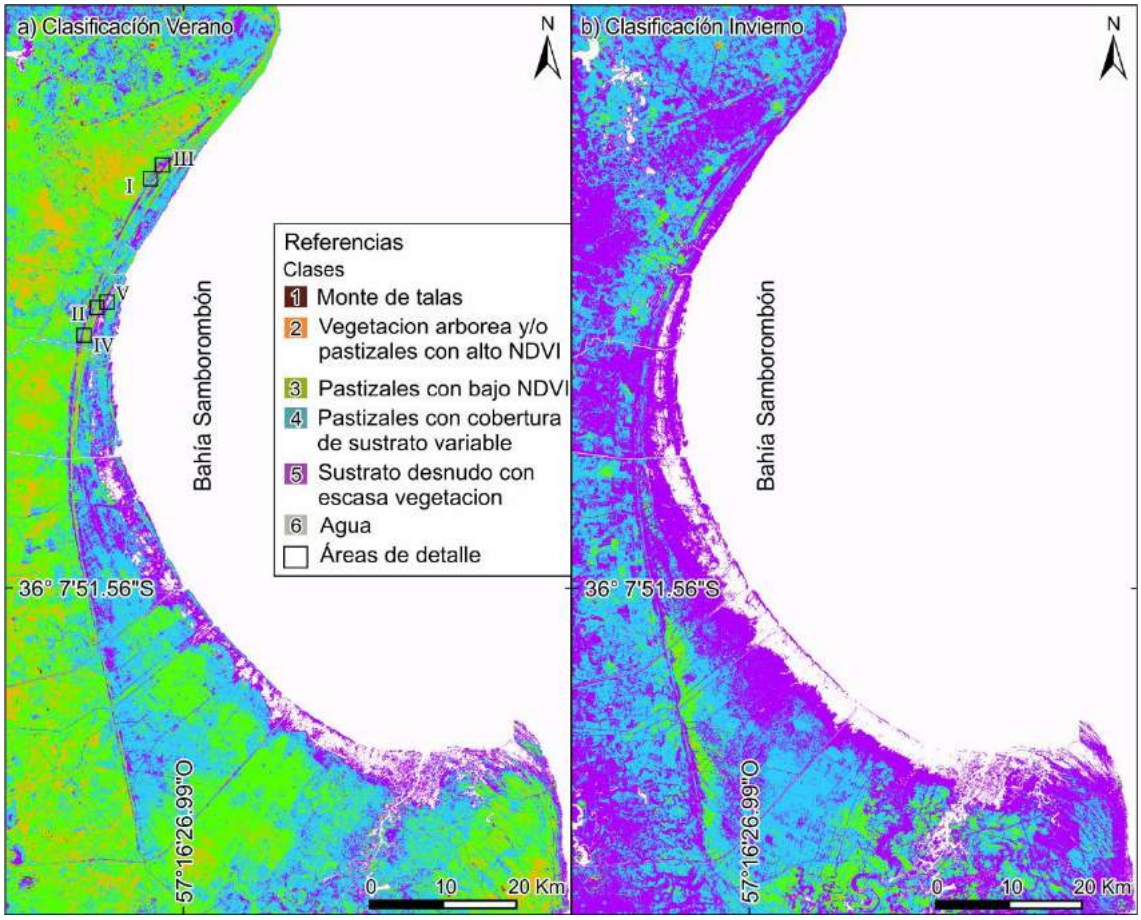

Figura 3. Análisis multitemporal de NDVI en el área de estudio obtenido mediante la serie Landsat, en recuadros negros se pueden observar las áreas de detalle analizadas. **a.** Verano. **b.** Invierno. Clases: **1.** Monte nativos de talas (Bordo). **2.** Monte de tala con especies arbóreas introducidas y/o perennes y pastizales ubicados en canales de marea (Naranja). **3.** Pastizales con bajo NDVI ubicados en la planicie de marea (Verde). **4.** Sustrato con cobertura de pastizales variable (Celeste). **5.** Sustrato desnudo con escasa vegetación (Violeta). **6.** Cuerpos de agua (Gris).

Por su parte, el análisis multitemporal evidencio distintos comportamientos respecto a las coberturas reconocidas (Fig. 3 y Fig. 4). En este sentido, el monte de talas (ver área I en

Fig. 3 y Fig. 4) posee una variación en el NDVI, la cual se corresponde con la estacionalidad y la pérdida de hojas debido a sus características caducifolias (Fig. 4a). Por otra parte, los montes de tala invadidos por especies exóticas (ver área II en Fig. 3 y Fig. 4) presentan un patrón similar al del monte de talas ya que también son arboles caducifolios (Fig. 4b), sin embargo, pueden diferenciarse por las firmas espectrales apoyadas en el relevamiento de campo. En los bosques implantados de eucalipto (ver área III en Fig. 3 y Fig. 4), si bien se observa una estacionalidad como en el monte de tala, esta es menos notoria dado al carácter perenne que posee el eucalipto. Pese a esto, la tendencia observada en el NDVI de estos montes es inversa a la de los montes de tala, mostrando mayor actividad durante los meses más fríos (Fig. 4c). Además, se observa que alrededor de 1997 el NDVI de ese monte de eucalipto crece notablemente. Mediante el análisis de fotografías de la década de 1980, se observa que inicialmente era un área de pastizales y, años más tarde fue implantado el monte dando como resultado una tendencia creciente del NDVI en la serie multitemporal.

Respecto al área IV (Fig. 3 y Fig. 4), el análisis evidencio un patrón similar al monte de talas hasta el año 2007 (Fig. 4d). Posteriormente, el NDVI disminuye abruptamente a valores que indican la falta de vegetación, situación que perdura hasta el 2011 aproximadamente. Luego, el NDVI se incrementa levemente, pero con un patrón diferente al del monte de talas. El análisis de la serie de imágenes satelitales permitió corroborar que anteriormente había un monte de talas, el cual fue extraído para la explotación de la conchilla subyacente. Finalmente, la cantera fue nivelada y actualmente el sitio posee el desarrollo de un pastizal.

Por último, en el área V (Fig. 3 y Fig. 4), primero se observa un patrón semejante al monte de tala, sin embargo, para el año 1999 los valores de NDVI se tornan negativos, demostrando falta de la cobertura vegetal inicial. Posteriormente, los valores oscilan a valores muy bajos, entre 0 y -0,2 aproximadamente. Estas variaciones según el análisis de imágenes satelitales y los relevamientos de campo efectuados, indican la remoción del monte de tala para la explotación de la conchilla. Después de 1999, la cantera generada fue ocupada por agua lo que conduce a valores de NDVI entre 0 y -1, mientras que el leve ascenso observado en estos se deba posiblemente a la presencia de algas las cuales fueron observadas en campo. En ambos casos (Fig. 4 d y e), puede observarse a partir del análisis temporal el cambio en los valores de NDVI que evidencia el momento en que el bosque nativo fue eliminado. Es importante resaltar que luego de la actividad minera no se ha observado en ninguna de las áreas estudiadas la recuperación del bosque nativo luego de la explotación del cordón litoral.

Respecto a los cambios asociadas a las lentes de agua dulce alojadas en los cordones litorales, si bien la salinidad del agua subterránea es baja tanto en los cordones litorales naturales como en los explotados, existe una modificación en la morfología de las lentes (Carol et al., 2015). Las mediciones de niveles freáticos evidencian que la disminución en la topografía luego de la explotación minera produce una somerización del nivel freático. Este cambio en el espesor de la zona no saturada, así como la decapitación de los suelos, podría ser el responsable de que no ocurra una regeneración del bosque nativo luego de la explotación minera del cordón litoral. Asimismo, trabajos antecedentes demostraron que en las zonas con canteras existe una eutrofización del agua dulce acumulada que afecta la calidad del recurso hídrico (Tanjal et al., 2019).

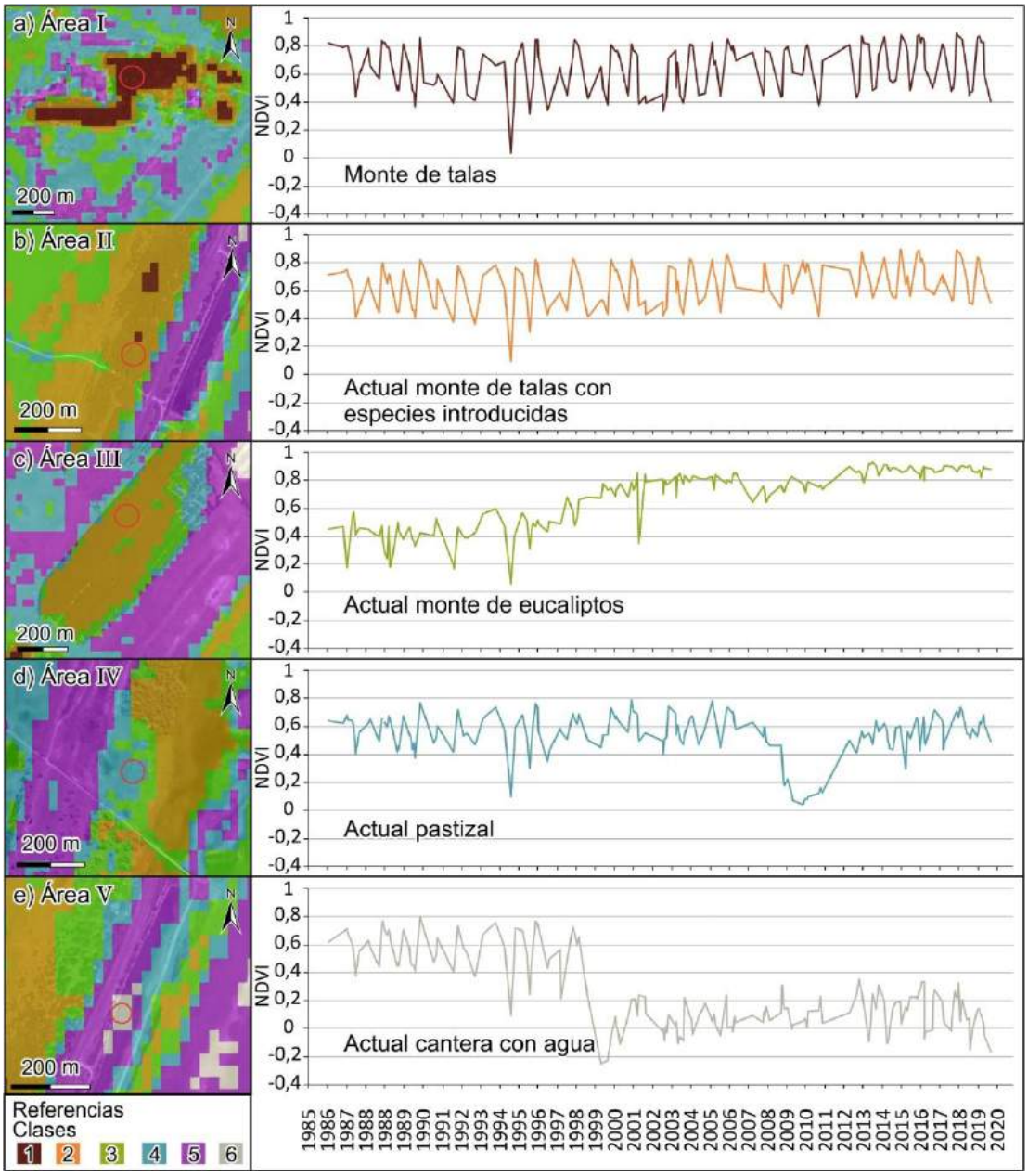

Figura 4. Análisis multitemporal del NDVI promedio en distintos cordones litorales obtenidos mediante la serie Landsat, las clases obtenidas fueron 1- monte de talas, 2- vegetación arbórea y/o pastizales con alto NDVI, 3- vegetación arbórea y/o pastizales con bajo NDVI, 4- pastizales, 5- sustrato desnudo con escasa vegetación y 6- agua. El círculo rojo indica el sector donde se realizó el análisis multitemporal de NDVI para cada área de detalle. **a.** monte de talas. **b.** monte de talas invadido. **c.** monte de eucalipto. **d.** cantera niveladas y crecimiento de pastizales. **e.** desarrollo de canteras ocupadas por agua.

CONCLUSIONES

La metodología generada permite identificar rápidamente los cambios ambientales que se han producido en los últimos 34 años en los cordones litorales asociados al humedal de Bahía Samborombón. El análisis multitemporal del NDVI y de las firmas espectrales en

las distintas áreas relevadas demostró cómo la actividad minera conduce a una disminución en los montes de tala, no sólo por la deforestación, sino también por la modificación que esta produce en el sustrato y agua subterránea. Asimismo, se pudo observar que en ninguna de las áreas estudiadas el monte de tala ha podido recuperarse luego de la explotación del cordón litoral.

Siendo los montes de tala del humedal de Bahía Samborombón uno de los últimos relictos de los bosques nativos de la región, la metodología propuesta en este trabajo constituye una herramienta para la generación de pautas de gestión y conservación de estos ambientes.

REFERENCIAS

Arturi, M. F., Goya, J. F. Estructura, dinámica y manejo de los talares del NE de Buenos Aires. Ecología y manejo de los bosques de Argentina, La Plata, Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (2004).

Borzi, G. E. Influencia de la actividad antrópica en la geohidrología de la cuenca del río Samborombón. Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata. (2018).

Carol, E. Procesos geohidrológicos y geoquímicos que condicionan la composición del agua subterránea en el humedal de Bahía Samborombón. Anales de la Academia Nacional de Ciencias. Exactas, Físicas y Naturales, tomo 67, 26-40. (2015).

Carol E., García L., Borzi G. Hydrogeochemistry and sustainability of freshwater lenses in the Samborombón Bay wetland, Argentina. Journal of South American Earth Sciences 60: 21-30 (2015).

Carol, E., Mas Pla, J., Kruse, E. Interaction between continental and estuarine waters in the wetlands of the northern coastal plain of Samborombón Bay, Argentina. *Applied Geochemistry* 34: 152 163 (2013).

Cellone F., Elizalde N., Tosi L., Carol E. Identificación y delimitación de lentes de agua subterránea dulce en la planicie costera del Río de la Plata, Punta Indio, Buenos Aires, Argentina. I Jornadas Internacionales y III Jornadas Nacionales de Ambiente (2016).

Elizalde, N. Modificaciones Antrópicas del Paisaje hidrológico ocurridas dese principios del siglo XX en un sector de la llanura costera del Río de La plata. Trabajo final de Licenciatura. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, UNLP (2020).

EOC, Geoservice. The Tandem-X 90m Digital Model. (2019). Recuperado de https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90/

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, *202*, 18-27 (2017).

Parodi, L. R. La distribución geográfica de: los talares en la Provincia de Buenos Aires. Darwiniana, 4(1), 33-56 (1940).

Sala, J. M.; González, N.; Hernández, M. A. Efectos de una barrera hidráulica natural en las aguas subterráneas del litoral de la Bahía de Samborombón. Obra del Centenario del Museo de La Plata, Tomo IV 153-166. La Plata. (1978).

Tanjal C., Carol E., Richiano S., Santucci L. Freshwater lenses as ecological and population sustenance, case study in the coastal wetland of Samborombón Bay (Argentina). Marine Pollution Bulletin 122, 426 – 431 (2017).

Tanjal C., González, J., Galliari, M. J., Melendi, E. Eutrofización en agua superficial en canteras abandonadas, un caso de estudio en Bahía Samborombón. 7° Congreso de Ciencias Ambientales - COPIME (2019).