

Sinergia de imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2 A para la delimitación de humedales a partir de un enfoque ecohidrogeomórfico

Synergy of Sentinel 1 and Sentinel 2 A images for the delimitation of wetlands from an ecohydrogeomorphic approach

NICOLÁS EMANUEL VIDAL QUINI¹  0000-0003-4352-6734

ALEJANDRA MABEL GERALDI¹  0000-0002-8792-1069

¹ Instituto Argentino de Oceanografía (IADO/UNS) - CONICET, Bahía Blanca, Argentina.

² Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina.

Resumen

En los últimos años se desarrolla un creciente interés en detectar, delimitar e inventariar humedales bajo un enfoque ecohidrogeomórfico para ampliar el conocimiento de estos ecosistemas y posibilitar la elaboración de lineamientos de gestión para su aprovechamiento. El objetivo de esta investigación es detectar y delimitar aquellos sectores que reflejan condiciones ecohidrogeomórficas favorables para definirlos como humedales en un sector de la cuenca Alsina ubicada en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Se aplicó una metodología complementaria entre imágenes ópticas y radar que consiste en la utilización de un modelo digital de elevación Alos Palsar e imágenes Sentinel 2 A y Sentinel 1. Se abordó un pulso de inundación en la laguna ocurrido en el año 2017. Los eventos húmedos reflejan el funcionamiento de la laguna y los sistemas de humedales. Se analizaron cambios biofísicos que ocurrieron en los sectores perilagunares en referencia al ingreso de lluvias. Los resultados verificaron la presencia de diferentes tipologías de humedales entre la laguna y su área perilagunar que durante una inundación funcionan como un ecosistema híbrido.

Palabras claves: Laguna somera, Humedales, Sensores remotos, Enfoque ecohidrogeomórfico.

Fechas • Dates

Recibido: 2020.01.19
Aceptado: 2021.04.09
Publicado: 2021.12.01

Autor/a para correspondencia Corresponding Author

Nicolás Emanuel Vidal Quini
nicolasvidalquini@gmail.com

Abstract

In recent years there has been a growing interest in detecting, delimit and inventory wetlands under an ecohydrogeomorphic approach to expand the knowledge of these ecosystems and enable the development of management guidelines for their use. The aim of this article is detect and delimit those sectors that reflect favorable ecohydrogeomorphic conditions to define them as wetlands in a sector of the Alsina basin located in the southwest of the province of Buenos Aires, Argentina. A complementary methodology was applied between optiand radar images, consisting of the use of a digital AlosPalsar elevation model and Sentinel 2 A and Sentinel 1 images. A flood pulse was addressed in the shallow lake that occurred in 2017. The wet events reflect the operation of the shallow lake and the wetland systems. Biophysical changes that occurred in the perilaguna sectors were analyzed in reference to the entry of precipitations. The results verified the presence of different types of wetlands between the shallow lake and its perilagunar area that during a flood function as a hybrid ecosystem.

Keywords: Shallow lake, Wetlands, Remote sensing, Ecohydrogeomorphic approach.

1. Introducción

Las inundaciones son uno de los eventos que producen mayores efectos para el ambiente y la vida humana. Estos tipos de desastres ocasionan altos costos ambientales y económicos como alteraciones biofísicas en los ecosistemas, pérdida y degradación de humedales, cambios en los procesos biológicos, dificultad del desarrollo de actividades antrópicas, entre otros. La ocurrencia de estos eventos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, especialmente en los sistemas lagunares y su entorno son frecuentes en períodos húmedos dado que las condiciones predominantes de bajas pendientes favorecen la acumulación de agua superficial (Monachesi, 1995; Geraldí et al., 2011). Estos ambientes afectados poseen una relevancia ecológica y limnológica para la región.

Uno de los componentes principales del sistema de lagunas “Encadenadas del Oeste” son los humedales perilagunares que se encuentran expuestos ante la variabilidad de precipitaciones que provocan frecuentes desagües anuales e interanuales en la región (Quirós et al., 2002; 2006). Los cambios en los patrones de inundaciones en el tiempo y espacio pueden ser indicativos de cambios importantes en el funcionamiento de estos ecosistemas (DeVries et al., 2017; Gayol et al., 2018) alterando la provisión de bienes y servicios ecosistémicos vinculados a funciones ecológicas que son vitales de valorar para los procesos de gestión territorial en la región. Los humedales cumplen una función reguladora de los ciclos hidrológicos, directamente relacionadas con la contención de inundaciones, retención de agua para consumo y producción, la recarga de acuíferos, control de erosión y retención de nutrientes en el aporte de la mejora de la calidad de las aguas. (Kandus et al., 2010; Acreman et al., 2013; Greenet al., 2017). Principalmente, son moderadores de las condiciones climáticas extremas con un alto valor paisajístico. En este sentido, Kandus y Minotti (2019a) afirman que los humedales y sus propiedades funcionales difícilmente pueden ser concebidos sino en el contexto de la matriz que los rodea. El paisaje abordado desde un enfoque ecohidrogeomórfico recupera el aspecto funcional de los ecosistemas de humedales y pone énfasis como unidad natural de gestión de los humedales (Manzo et al., 2018; Kandus y Minotti, 2019a).

Es por ello, que en los últimos años se desarrolla un creciente interés en detectar, delimitar e inventariar estas unidades bajo este enfoque para ampliar el conocimiento de estos ecosistemas y

posibilite la elaboración de lineamientos de gestión para su aprovechamiento sostenible (Kandus et al., 2018; Rubio et al., 2018; San Martín et al., 2018; Mulvany et al., 2019; Rodríguez et al., 2019).

La teledetección a través de los sensores remotos constituye una de las herramientas más importantes para la detección de humedales y monitoreo de inundaciones (Di Bella et al., 2008; Domeneghetti et al., 2019). Proporcionan datos oportunos de la extensión de la inundación sobre un área determinada con una resolución espacial y temporal dependiente del tipo de sensor. Esto permite obtener información acerca de aspectos ecológicos y biodiversidad en ecosistemas de humedales característicos por su difícil acceso en campo (Salvia et al., 2009). El uso de sensores pasivos proporciona información de parámetros biofísicos en áreas heterogéneas a través de la captura de energía electromagnética proveniente del sol que es reflejada, así como la emitida por la cubierta terrestre en distintas longitudes de onda. En cambio, los sensores activos emiten su propia señal, por lo tanto, no dependen de la energía del sol y se caracterizan por su capacidad de penetrar la cubierta de nubes, factor limitante para la captación de datos de los sensores ópticos especialmente en inundaciones permitiendo el monitoreo y mapeo del impacto del evento (Sevillano et al., 2020). Sin embargo, la señal del radar es afectada por las condiciones ambientales, fenología, nivel del agua y condiciones climáticas como el viento o la lluvia, como también las características del sensor referidas a la frecuencia de onda, polarización y el ángulo de incidencia (Kandus et al., 2001). La obtención de información de la cubierta de forma complementaria a través de estas herramientas provee información vital sobre el impacto de las inundaciones (Chaouch et al., 2011; Anusha y Bharathi, 2019; Liu et al., 2019).

El objetivo del presente trabajo es identificar los sectores de humedales en función de las condiciones ecohidrogeomórficas. Se pretende, además, analizar el comportamiento de las precipitaciones en relación a los cambios ocurridos en el ambiente.

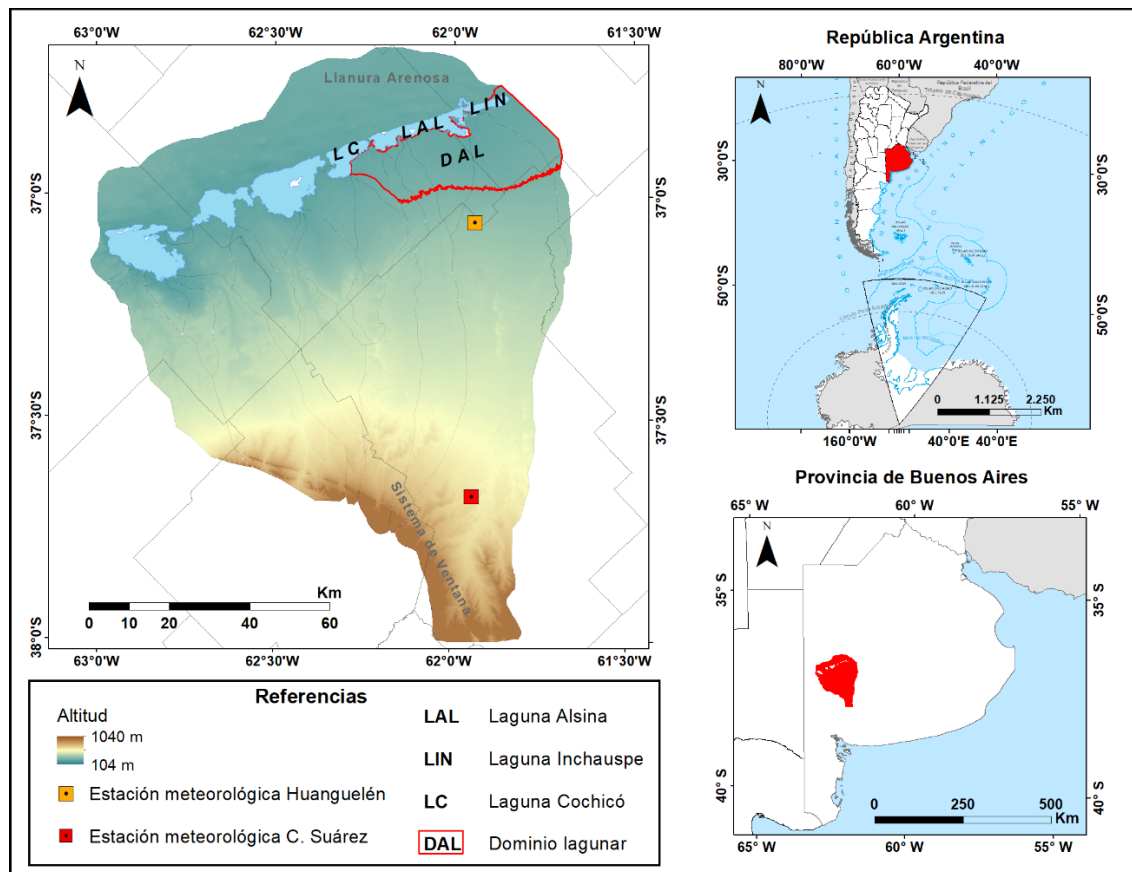
2. Metodología

El área de estudio comprende una zona de llanura con presencia de lagunas de profundidad media pertenecientes al sistema pampeano ubicadas en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Específicamente, el trabajo se desarrolla en laguna Alsina y su dominio ambiental lagunar sur que forman parte de la cuenca de las Encadenadas del Oeste caracterizada por una geomorfología regional definida por áreas altas al sur de la cuenca, una zona extremadamente plana en el centro y por último una depresión que ocupan dichas lagunas producto de una falla regional.

La laguna Alsina se caracteriza por ser la menos profunda de la cuenca con una profundidad media de 3 metros y se encuentra conectada hacia el oeste con laguna Cochicó y hacia el este con laguna Inchauspe alimentada por arroyos permanentes. Las áreas cercanas a la laguna corresponden al dominio lagunar el cual se extiende a partir de la curva de nivel de 150 metros en el sector sur. Este dominio se caracteriza por presentar discontinuidades topográficas y presencia de conos aluviales que son producto de la migración y la deposición de materiales provenientes de los arroyos. El sector norte de la laguna, posee otras características donde la altura máxima es de 130 metros y se constituye exclusivamente por médanos paralelos a la laguna y en las partes cóncavas de estos se alojan lagunas de carácter intermitente. El ambiente es un escenario de fragilidad ante eventos de excedentes hídricos dado a su incapacidad de evacuar grandes volúmenes de agua con lo cual ocurren frecuentes inundaciones (Falasca et al., 1995; Miraglia, 1996; Geraldi, 2009; Geraldi, 2010).

Recientemente, se ha desarrollado el Inventario de Humedales de la Provincia de Buenos Aires desarrollado por el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS2019) que caracteriza a los humedales bajo sistemas de paisajes.

Figura 1. Área de estudio: Localización del dominio ambiental sur y estaciones meteorológicas.



Fuente: Elaboración propia en base a datos del Instituto Geográfico Nacional y modelo digital de elevación Alos Palsar.

Para este trabajo se optó por el desarrollo de una metodología complementaria entre sensores activos y pasivos para la delimitación de humedales en función de las condiciones ecohidrogeomórficas. En primer lugar, se identificaron sectores susceptibles ante cambios por la dinámica hídrica. Para ello, se utilizaron nueve imágenes Radar de Apertura Sintética Sentinel 1 (Path 141 Row 714). Se trabajó con las polarizaciones VH y VV donde en el primer caso la señal es emitida de forma vertical y se mide la fracción de la polarización horizontal. La polarización VV es emitida y captada en la misma fracción de polarización vertical. El beneficio del uso de polarización múltiple permite interpretar clasificaciones visuales como automáticas, investigar las propiedades de la reflexión en diferentes superficies y seleccionar la polarización para una detectabilidad óptima.

Se realizó un seguimiento del coeficiente de retrodispersión en la sección temporal comprendida entre enero y septiembre 2017. Las imágenes se obtuvieron de la base de datos pertenecientes al Instituto de geofísica de la Universidad de Alaska Fairbanks, que mantiene el archivo de National Aeronautics and Space Administration (NASA) de datos de radar de apertura sintética (SAR). Las características de estas imágenes se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características de las imágenes Sentinel 1 modo IW.

PARÁMETROS	SENTINEL 1
Modo de antena	Interferometric Wide-swath mode (IW)
Polarización	VV+VH
Ángulo de incidencia	31° - 46°
Resolución	20 m
Ancho de barrido	250 km
Frecuencia	Banda C
Tiempo de revisita	12 días

Fuente: Elaboración propia en base a datos obtenidos en sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1.

Las imágenes Sentinel 1 fueron recortadas en torno al área de estudio y se les efectuó un multi-looking, luego se las calibró y se las corrigió geométricamente. En los parámetros de la ortorectificación se tomó como referencia el modelo digital de elevación DEM SRTM 1sec HGT y luego se obtuvo la proyección del ángulo incidente sobre el local y el del elipsoide para trabajar con una resolución del pixel de 10 m. Los datos calibrados se filtran para reducir el ruido de moteado inherente del SAR y recortado en rango y azimut para eliminar el ruido del borde de la imagen. El resultado del pre procesamiento es un proyecto re-proyectado y calibrado radiométricamente.

Luego del pre procesamiento de las imágenes radar se realizó una diferencia entre una imagen durante el evento de inundación y una imagen en el momento previo al evento. Ambas imágenes refieren al mes de septiembre y enero de 2017 respectivamente. A partir de la imagen resultante se elaboró el histograma y se implementó un límite de umbral con el objetivo de extraer el cambio negativo en la retrodispersión. El límite de umbral implementado en Long et al. (2014) se observa en la siguiente ecuación:

$$P_i < ((\mu [D] - c \times (\sigma [D])))$$

donde P_i son los píxeles identificados como inundados, μ y σ la media y la desviación estándar de D , que es la diferencia de imagen y c es un coeficiente. Se encontró que c óptimo es 1,5 por Long et al. (2014).

El pre evento y el evento se trabajó con imágenes ópticas Sentinel 2 A para el cálculo de los índices de sequedad y NDVI. Estos índices son indicadores claves en la proporción de biomasa. El índice de sequedad relaciona las longitudes de onda del verde (0,54-0,57 μm) y el infrarrojo medio (1,56-1,65 μm) brindando información complementaria sobre la sequedad de la biomasa vegetal y el suelo. Los valores más altos del índice indican terrenos que presentan una cobertura de biomasa seca o leñosa, y/o suelo desnudo seco.

Las imágenes fueron trabajadas en la plataforma de Google Engine Code a las cuales se les incorporó máscaras de nubes por medio de la banda de calidad del sensor. Esta máscara permite identificar píxeles con nubes y sin nubes y el procesamiento se realiza con una resolución espacial de 60 m para todas las bandas espectrales. El resultado del índice se clasificó en imagen binaria correspondiente a 0 como ausencia de biomasa y 1 presencia de biomasa.

Se realizó una diferencia entre las imágenes de septiembre y enero resultando un nuevo ráster con valores de -1, 0 y 1 donde los cambios de la superficie de vegetación por agua son 1, no hay cambios es 0 y cambios de agua por vegetación es -1. El resultado de los dos productos se combinó.

Mediante un DEM obtenido del sensor Alos Palsar con una resolución de 12,5 m se aplicó el índice de humedad topográfica (TWI). En términos de una cuenca específica, el TWI describe la tendencia del agua que se acumula en un punto dado y la pendiente local indica el efecto de las fuerzas gravitacionales en el movimiento del agua dando una alternativa para delinear áreas propensas a inundaciones. Las áreas con pendientes pronunciadas tienen menor disponibilidad de agua, mayor drenaje y valor bajo de TWI, mientras que las depresiones tienen un valor de índice alto con capacidad de almacenar agua.

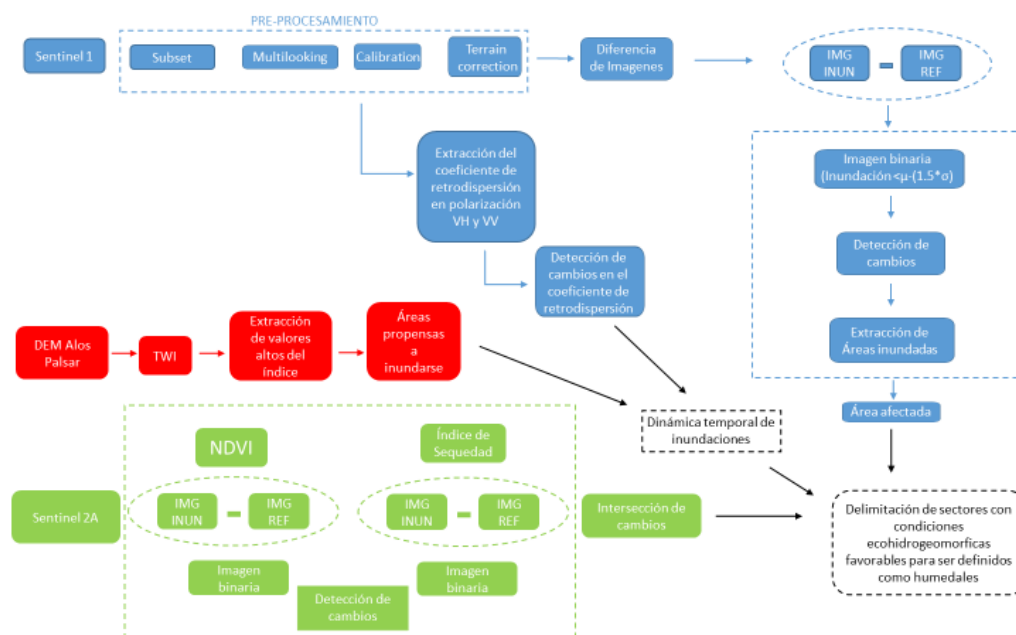
En conjunción con el TWI se realizó un seguimiento de los valores del coeficiente de retrodispersión en cuatro zonas específicas pertenecientes al sector perilagunar durante el intervalo de enero y septiembre para la detección de cambios en dichos valores.

Por último, con el fin de observar la cantidad de precipitaciones durante el año 2017 y sus variaciones se calcularon anomalías de precipitación para cada uno de los meses del año. Se trabajaron datos de precipitación obtenidos de dos estaciones meteorológica ubicadas en cercanías del dominio ambiental (localidad de Huanguelén, Cooperativa Eléctrica Huanguelén) y en la alta cuenca (aeródromo de Coronel Suárez, Servicio Meteorológico Nacional). Los valores obtenidos fueron observados para trabajar en complemento con los resultados pertinentes a las imágenes de sensores remotos.

La metodología se ajusta bajo un enfoque ecohidrogeomórfico. Según este enfoque, la ocurrencia de los humedales está determinada por la existencia de un ámbito geomórfico particular, así como también de condiciones litológicas y edáficas, que permitan su emplazamiento garantizando la presencia temporaria o permanente de agua superficial o subsuperficial (Brinson, 1993; Semeniuk y Semeniuk 1997; Kandus y Minotti 2019a; Kandus y Minotti 2019b).

Para una mejor simplificación de la metodología de este trabajo se ilustra en la figura 2, un diagrama de flujo con los pasos detallados.

Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención de sectores con condiciones ecohidrogeomórficas.

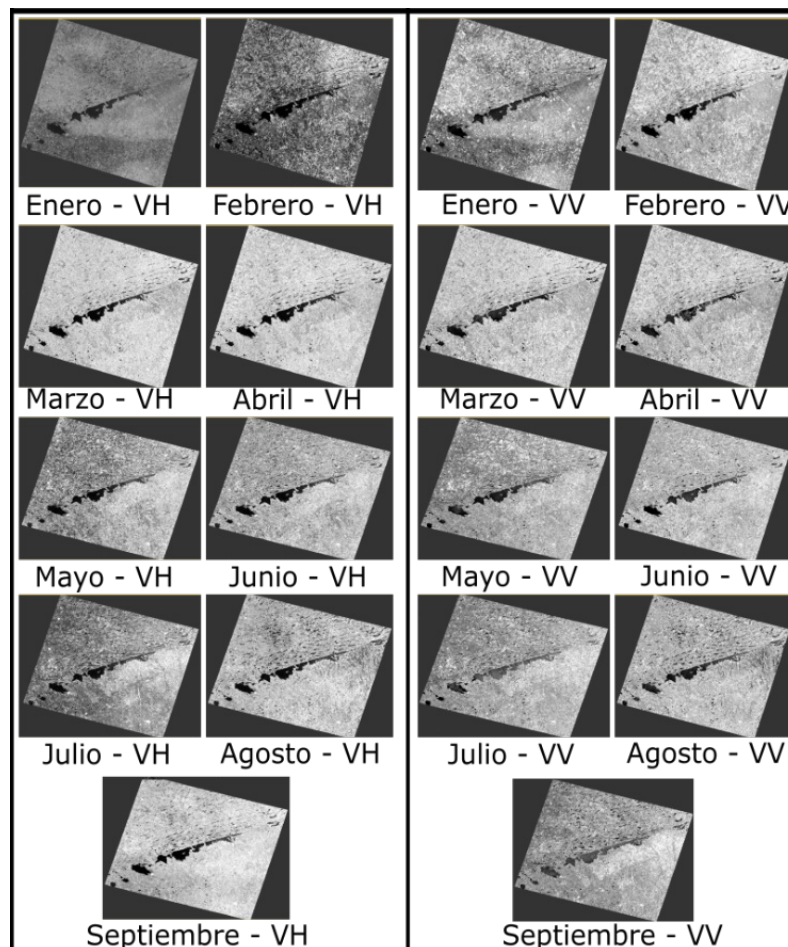


Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados

En la figura 3 se presentan las imágenes Sentinel 1 y las diferentes polarizaciones utilizadas que denotan distintas rugosidades en la superficie y que definen la intensidad de los pulsos retrodispersados. Las imágenes del mes de febrero y septiembre poseen un mayor contraste en referencia a la variación de las propiedades dieléctricas del terreno que afectan la señal retrodispersada y evidencian cambios en el ambiente de las lagunas. Por ejemplo, hacia el sur de la laguna se verifican áreas con un coeficiente de retrodispersión mucho más alto que las áreas de llanura donde se observa disminución de la rugosidad asociada a valores muchos más bajos que son reflejados en la textura de las imágenes.

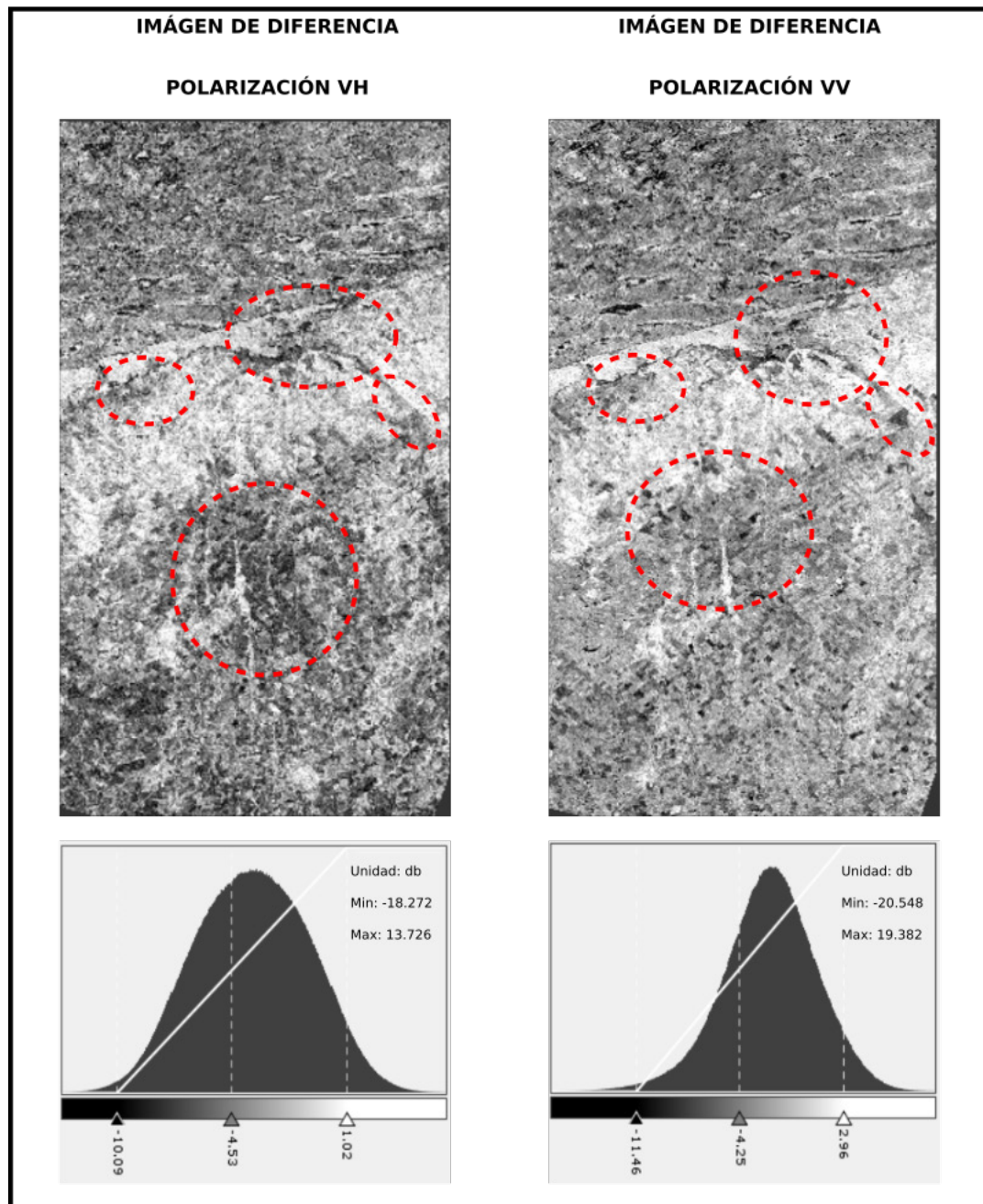
Figura 3. Imágenes Sentinel 1 pre procesadas. Polarizaciones VH y VV para el intervalo de tiempo enero-septiembre del año 2017.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se presentan las imágenes resultantes de la diferencia entre el momento previo y durante la anomalía de precipitación para ambas polarizaciones. La polarización VV posee un intervalo más amplio en los valores del coeficiente de retrodispersión y difieren en sus máximos y mínimos. Ambas imágenes muestran una diferencia en los valores de retrodispersión en los sectores perilagunares, las planicies de inundación de los arroyos y en sectores dedicados a actividades agrícolas. Estas diferencias se vinculan con inundaciones que fueron captadas por ambas polarizaciones.

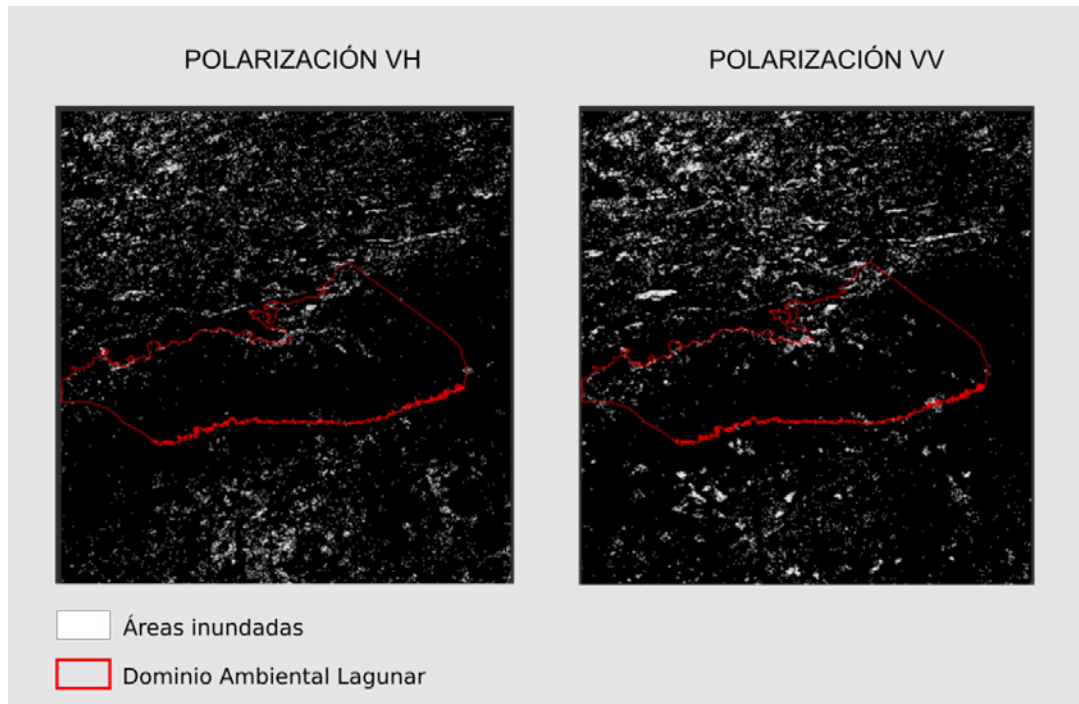
Figura 4. Imágenes resultantes de la diferencia entre imagen pre evento y durante anomalías de precipitación para ambas polarizaciones recortadas a escala de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

La aplicación del algoritmo sobre las imágenes de diferencia registró 35,7 Km² de sectores inundados con polarización VH y 46,5 Km² con polarización VV para las áreas del dominio ambiental. Se evidencian inundaciones y anegamientos hasta la curva de 150 metros que define el dominio lagunar. No obstante, en sectores fuera del dominio que corresponden a la llanura, se observan grandes extensiones afectadas por el ingreso de lluvias en zonas agrícolas – ganaderas (Figura 5).

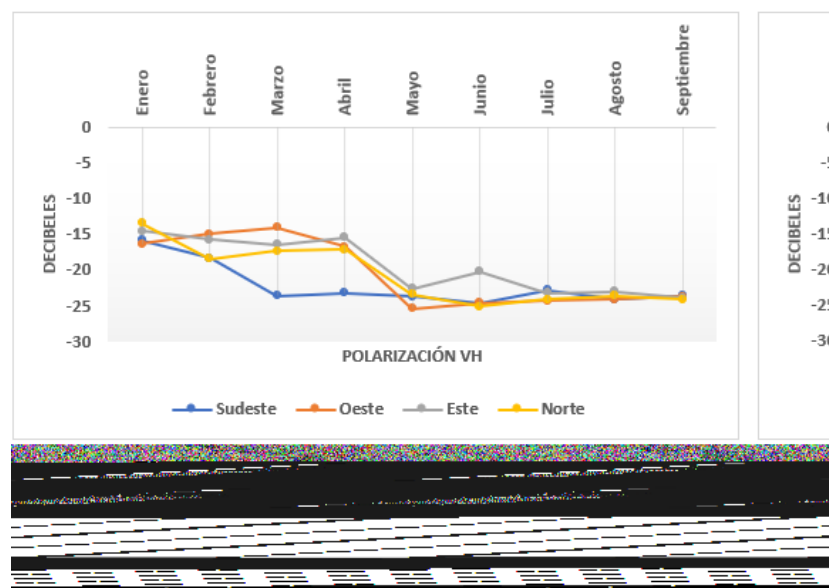
Figura 5. Áreas inundadas en polarización VV en imágenes Sentinel 1 (a). Áreas inundadas en polarización VH en imágenes Sentinel 1 (b).



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Sentinel 1.

El TWI discrimina sectores con depresiones propensos a inundarse en el área perilagunar y sectores en dirección norte y este con respecto a la laguna (Figura 6). El área perilagunar del este y las depresiones que se localizan de manera contigua se destacan por residir agua durante los eventos anómalos positivos de precipitación.

Figura 6. TWI en sector perilagunar y zonificación de áreas de muestra para la captación de valores del coeficiente de retrodispersión en la serie de tiempo enero - septiembre.

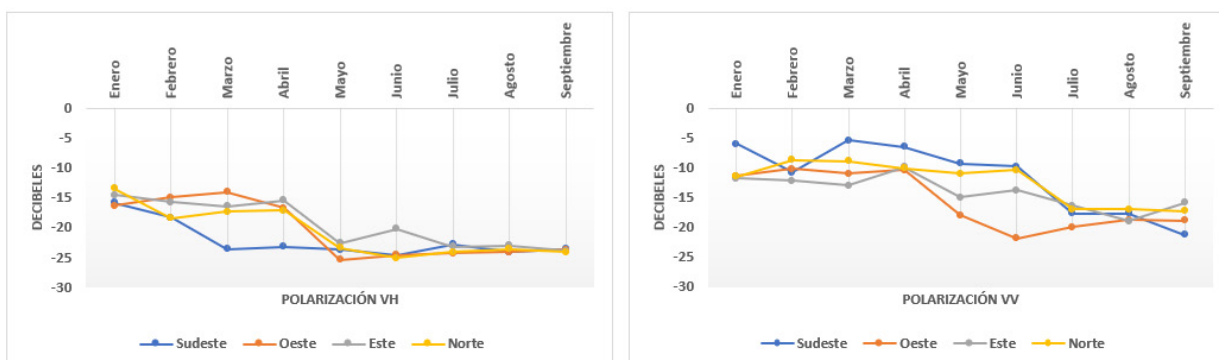


Fuente: Elaboración propia en base a modelo digital de imagen Alos Palsar.

Los cuatro sectores seleccionados para observar el comportamiento del coeficiente de retrodispersión (Figura 7) presentan cambios. El monitoreo con polarización VH en el sector sudeste evidencia un cambio repentino en el mes de febrero y un mínimo en el mes de marzo. La tendencia de valores muy bajos para el coeficiente se mantiene hasta el mes de septiembre asociada a la reflexión especular entre la señal del sensor y la cubierta. En cuanto a la polarización VV, presenta un cambio en febrero con un leve aumento en marzo. Sin embargo, en el mes de abril comienza una tendencia decreciente que continua durante toda la serie temporal. En julio se observa un fuerte descenso de los valores.

El muestreo en el sector este mantiene los niveles de retrodispersión en ambas polarizaciones hasta abril. En el mes de mayo estos valores decrecen de manera abrupta manteniendo la tendencia del rango hasta septiembre. En el oeste los valores de retrodispersión manifiestan cambios con tendencias de decrecimiento a partir del mes de mayo. En este mes se registra el valor mínimo del coeficiente para polarización VH. No obstante, para los valores de polarización VV el mínimo es en agosto. Este sector presenta los valores mínimos de toda la serie. Por último, el área norte presenta cambios de tendencia negativa a partir de abril para la polarización VH y el mes de julio para la polarización VV.

Figura 7. Variación del coeficiente de retrodispersión obtenido de imágenes Sentinel 1, polarización VH. Serie de tiempo enero – septiembre 2017(a). Variación del coeficiente de retrodispersión obtenido de imágenes Sentinel 1, polarización VV. Serie de tiempo enero – septiembre 2017 (b).



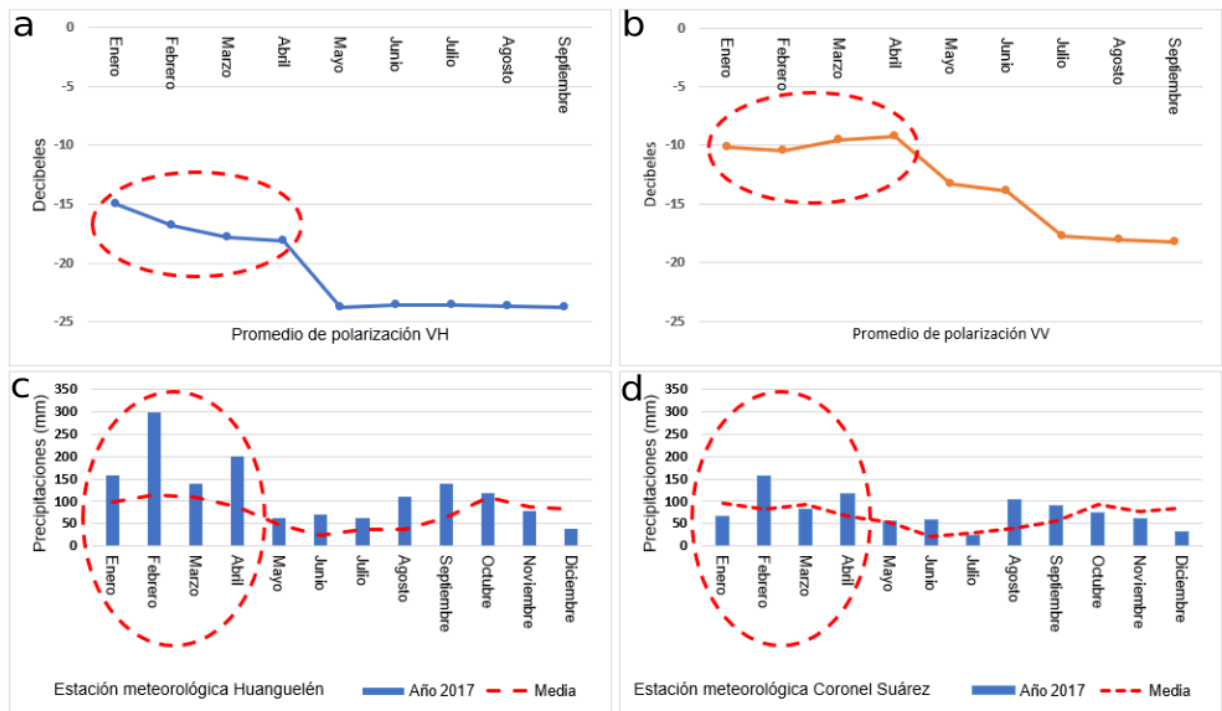
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Sentinel 1.

En la figura 8a y 8b se observa el promedio del comportamiento de los valores de retrodispersión con un importante cambio a partir del mes de mayo para ambas polarizaciones. Durante este período de tiempo se registró una precipitación acumulada de los 796 mm en la estación meteorológica Huanguelén y 422 mm en la estación meteorológica Coronel Suárez. La cantidad de precipitaciones para el intervalo de estudio fue de 1241,44 mm y 754,9 mm respectivamente.

La estación meteorológica ubicada en cercanías al dominio ambiental lagunar registra anomalías positivas durante todo el período de estudio a diferencia de la estación en la alta cuenca. Se destaca de manera significativa los meses de febrero y abril que registran 182,51 mm y 113,9 mm por encima de la media mensual en forma respectiva. Además, los registros de precipitación acumulada en el intervalo enero-abril indicaron una precipitación acumulada en torno a 796 mm cercano a la media anual de la región.

En la parte superior de la cuenca Alsina se registra en los meses de febrero, abril, junio, agosto y septiembre que las anomalías son muy superiores de la media siendo febrero y agosto los meses con mayor diferencia; 78,36 mm y 65,21 mm respectivamente (Figura 8 c y d).

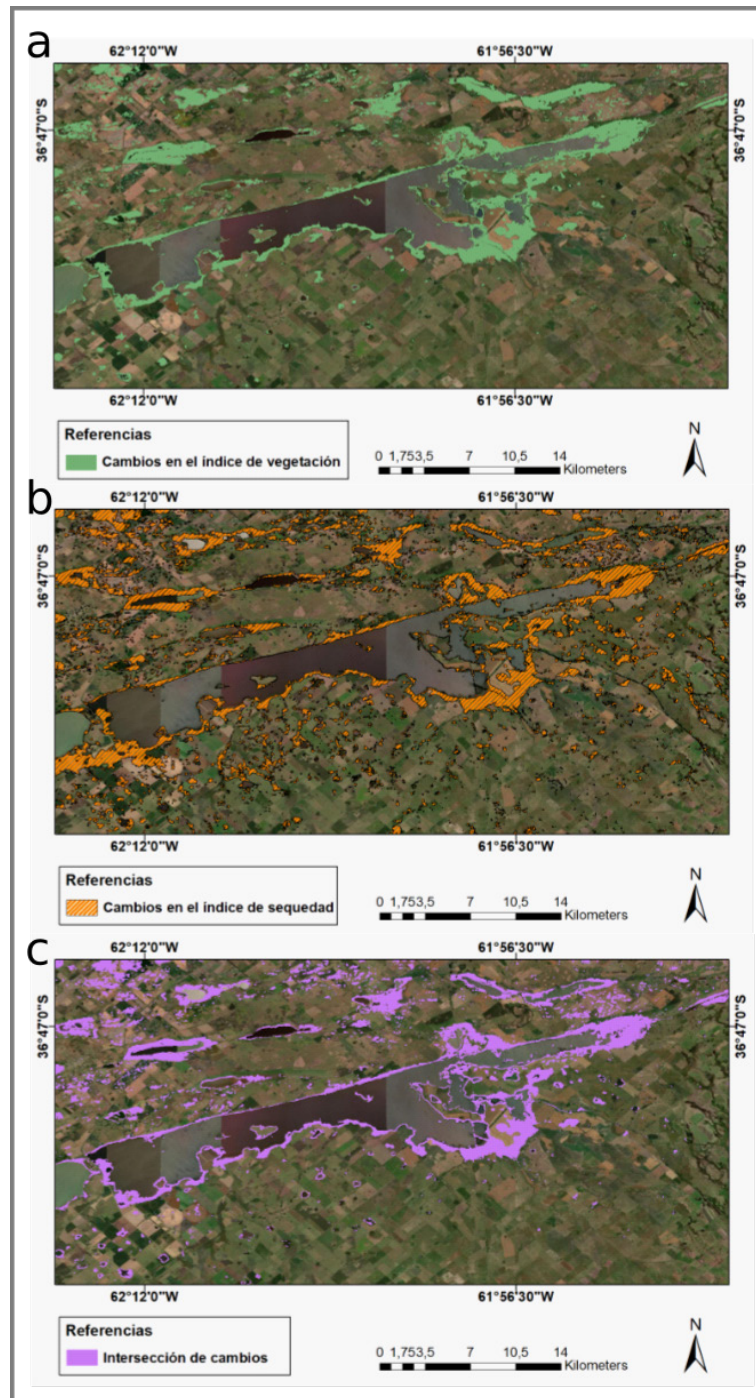
Figura 8. Evolución temporal del coeficiente de retrodispersión promedio obtenido de imágenes Sentinel 1, polarización VH (a). Evolución temporal del coeficiente de retrodispersión promedio obtenido de imágenes Sentinel 1, polarización VV (b). Anomalías de precipitación. Estación meteorológica Huanguelén (c). Anomalías de precipitación y medias mensuales. Estación meteorológica Coronel Suárez (d).



Fuente: Elaboración propia en base imágenes Sentinel 1 y datos de precipitación de las estaciones meteorológicas de Coronel Suárez y Huanguelén durante el año 2017.

En el análisis de las imágenes ópticas se presentan coincidencias en los sectores perilagunares y contiguos a la laguna (Figura 9a y 9b). Las mismas reflejan cambios en la biomasa y resultan de una superficie de 36,44 Km² que corresponden al sector perilagunar de laguna Alsina (Figura 9c). En cuanto a los resultados obtenidos en el dominio ambiental fueron descartados por la alta densidad y cobertura de nubes en la imagen que interfieren en el área.

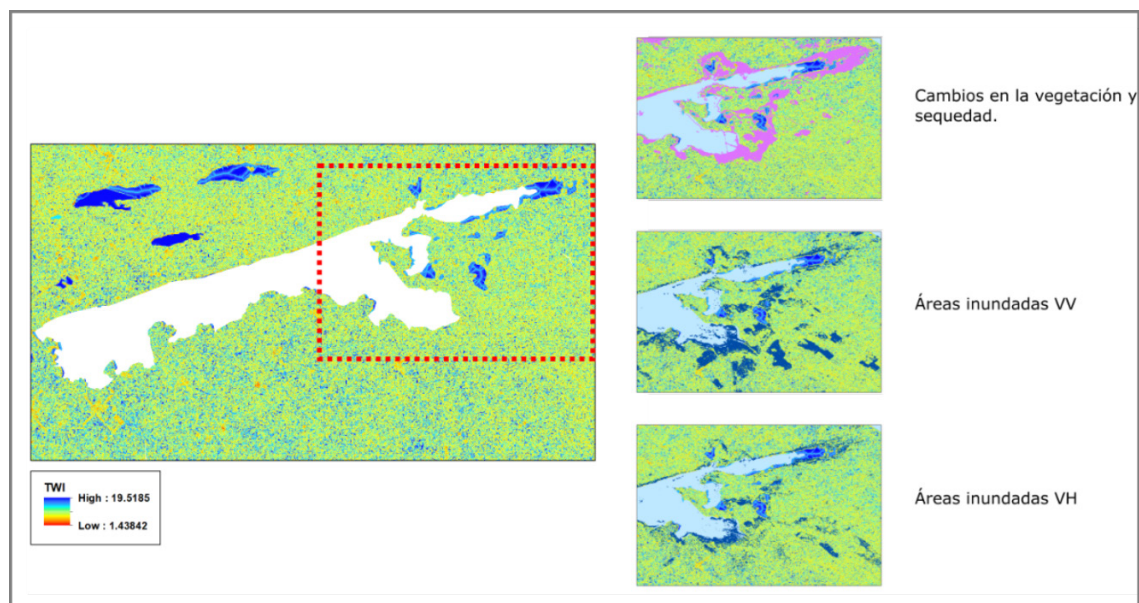
Figura 9. Detección de cambio en los índices de vegetación a partir de imágenes Sentinel 2A (a). Detección de cambios en el índice de sequedad a partir de imágenes Sentinel 2A (b). Intersección de cambios de índices ópticos (c).



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes Sentinel 2A y datos Esri.

En la figura 10 se destacan los sectores perilagunares y las depresiones al este de la laguna que fueron afectados por cambios en la biomasa e inundaciones obtenidas por las imágenes ópticas y de radar. En ella se observan las áreas que con mayores transformaciones en el paisaje que evidencian un patrón de conexión entre estos dos sectores.

Figura 10. Índice de humedad topográfica y su relación con sectores afectados por inundaciones y cambios en la vegetación y sequedad.



Fuente: Elaboración propia en base a modelo digital de elevación de imagen Alos Palsar, imágenes Sentinel 1 y Sentinel 2A.

4. Discusión

Los dos tipos de polarización de las imágenes radar presentan patrones diferenciales entre los ambientes de las lagunas. De forma visual a partir de las texturas de las imágenes se advierten cambios en los coeficientes de retrodispersión en función de su ubicación con respecto a los cuerpos lagunares. Las lagunas funcionan como un eje que evidencia distintas situaciones ambientales hacia el norte y hacia el sur como afirma Geraldí (2009). La textura del dominio lagunar sur es uniforme y contrasta con los sectores perilagunares, llanuras de inundación de los arroyos y sectores con distribución no uniformes representados por patrones de retrodispersión bajos como se observa en otros estudios de sistemas de humedales (Salvia et al., 2009; Montgomery et al., 2018). Este aspecto expone la hidrografía local (Peimanet al., 2017) y la tipología de humedales del área de estudio que coincide con la descripción general de tipos de humedales en el sistema de paisaje de Lagunas Encadenadas del Oeste elaborada por la OPDS en 2019.

La textura se observa con mayor detalle en las imágenes obtenidas de la diferencia entre el pre-evento y durante la anomalía recortadas en la escala del área de estudio. Ambas polarizaciones presentan contrastes entre las áreas de transición entre el dominio de llanura y el lagunar. Maleki et al. (2019) muestra que en imágenes Sentinel 1 las áreas oscuras que refieren a valores de decibels bajos son indicadores de cuerpos de agua y humedales lo cual permiten diferenciarse de vegetación emergente densa y escasa que no corresponde a estas unidades. Esto permite observar que ciertos patrones oscuros se encuentran en áreas de usos agrícolas ganaderos. Otro aspecto importante de señalar es que las áreas del dominio lagunar posee texturas rugosas y difiere de la planicie que muestra un patrón de texturas más suaves. Esto puede ser explicado por la morfología de los ambientes que influyen en la dinámica hídrica en referencia al impacto diferencial que producen los excesos de agua. En cada ambiente ocurren diferentes situaciones topográficas como consecuencia de la transición de pendientes menores al 1% que desacelera los flujos

horizontales del agua hacia discontinuidades topográficas donde se encuentran conos aluviales próximos a la laguna.

Los sectores perilagunares de laguna Alsina también presentan características diferentes al dominio lagunar. Se discriminan áreas que quedaron bajo agua a medida que las anomalías de precipitación aumentaron. En este sentido, los resultados de la aplicación del algoritmo registran mayor cantidad de píxeles con agua para este sector. Esta aproximación permite delimitar el crecimiento máximo de la laguna y denota su hidrodinámica. La dirección del flujo de agua es hacia el este contrario a lo esperado de acuerdo a la dirección de la pendiente regional en sentido oeste que remite al origen estructural del emplazamiento del cuerpo de agua (Malagnino, 1988; Cordini, 1942; Balmaceda, 1951).

La relación entre los resultados del TWI y las áreas con píxeles de agua detectan la franja lacustre que conforma al ambiente ripario. A su vez, el TWI, discrimina sectores de depresiones en el este de la laguna donde prevalecen condiciones para la acumulación de agua, pero de baja energía. La franja lacustre y el sector de depresiones pertenecen a dos clases de humedales basados en la clasificación propuesta en Brinson (1993) que clasifica humedales en función de su emplazamiento y de acuerdo a su localización. Desde el punto de vista hidrológico estos humedales son limnógenos y regularmente inundados (Tiner et al., 2015) que dependen de eventos húmedos.

El análisis temporal del coeficiente de retrodispersión para las áreas de la franja lacustre respalda la tendencia de la dirección este del flujo de agua. Los resultados expresan que el sector sudeste es el primero en presentar variaciones importantes en la retrodispersión en sentido espejudo. Este comportamiento denota la variación de la hidrodinámica en humedales mediante las propiedades del coeficiente y permite detectar los cambios en el nivel del agua sobre el humedal como se ha visto en Yuan y Jung (2015) y Zhang et al. (2016) en humedales con gran amplitud de variación del nivel de agua. Los suelos de esta área se caracterizan por poseer una alta susceptibilidad a la erosión hídrica que, en algunos casos, presentan características salinas, alta sodicidad y perfiles cóncavos (Geraldí, 2009). Los otros sectores de muestreos indicaron cambios un mes después e infieren condiciones ambientales más favorables para retener los excesos de agua y demorar la crecida de la laguna.

En cuanto al comportamiento general de la retrodispersión, es un indicador de los cambios temporales de las condiciones ambientales y evidencia el inicio de la crecida de la laguna de acuerdo a las variaciones del coeficiente. Esta situación podría inferir variaciones en condiciones topográficas y ecológicas para cada sector de la laguna. En este sentido, la franja lagunar presenta cambios en el comportamiento en el mes de abril cuando la precipitación acumulada se encontraba muy cercana al promedio anual de la región de 800 mm (Geraldí, 2009). Aquí se evidencia las fuertes variaciones que puede tener las precipitaciones en un período húmedo lo cual indica su influencia como principal fuente de agua en el régimen hidrológico de estos humedales como afirma Quirós (2005). Además, se destaca que en este evento se identifican humedales que en períodos secos son difíciles de detectar dado que las características hidrográficas del área no se exponen en su totalidad. Es importante señalar que previo a estos cambios, la polarización VV reflejó un leve incremento del coeficiente que podría ser explicado por el aumento de la humedad del suelo. Estas asociaciones se observan en estudios de casos y modelos de humedad (Paloscia et al., 2013; Clement et al., 2018; Lin et al., 2019).

Los resultados de las imágenes ópticas marcaron la presencia de cambios asociados a la presencia y ausencia de biomasa tras los eventos anómalos. Si bien, la aplicación de ambos índices no es

suficiente para abordar aspectos ecológicos, permite demarcar los límites ante el avance de agua de acuerdo a límites geomorfológicos que fueron observados en el TWI y las imágenes radar. No obstante, las áreas que presentaron píxeles de agua en las imágenes radar y contenido de clorofila en las imágenes ópticas podrían inferir áreas con vegetación baja donde la cobertura vegetal no es lo suficientemente alta como para influir en la retrodispersión, pero su contenido de clorofila influye en la reflectancia (Bolanos et al., 2016). Salvia et al. (2012) afirma que para niveles de agua más altos y en presencia de cubierta vegetal, las inundaciones también reducen la altura de la vegetación emergida, por lo tanto, las inundaciones disminuyen la rugosidad. Sin embargo, Slagter et al. (2020) y Gulácsi y Kovács (2020) concuerdan en que la cobertura de agua bajo un dosel de vegetación no se puede detectar para humedales herbáceos con mayor cobertura de vegetación utilizando los datos de Sentinel-1. Para el área de estudio, estos límites poseen una alta complejidad dado que la cubierta vegetal se constituye de comunidades hidrófitas y su ecotono es ocupado por plantaciones y pasturas agrícolas. Por lo tanto, resulta evidente que es necesario un muestreo en campo para obtener mayor precisión en los resultados.

La evidencia presentada indica la presión que posee el humedal acuático ante las producciones agropecuarias y la situación crítica de los humedales terrestres con alto grado de intervención antrópica, una situación característica de la región pampeana (Quirós et al., 2006; Matteucci, 2012). Como se observó en las imágenes, estos ecosistemas juegan un papel importante dado que brindan protección ante las frecuentes inundaciones y tormentas en un área con muy baja pendiente.

Desde el punto de vista paisajístico, según la propuesta elaborada en el Inventario Nacional de Humedales por Kandung y Minotti (2019b), la forma de emplazamiento hidrogeomórfico de las pequeñas depresiones corresponden a elementos del paisaje que se manifiestan en forma de parches dentro de una matriz terrestre. No obstante, cuando ocurre el exceso de agua en la región, estos elementos forman parte del mosaico de humedales que es conformado por el eje de lagunas Encadenadas del Oeste del cual forma parte laguna Alsina. Por lo tanto, en la situación anómala positiva de precipitación ambas matrices funcionan como un ecosistema híbrido. Esta situación infiere dos tipos de humedales según la clasificación de tipo de humedales basada en el hidropérido propuesta por Stewart y Kantrud (1971). Las áreas de la franja lacustre son humedales semipermanentes que dependen de ciclos húmedos y las depresiones del este a humedales temporarios que conectan con la laguna durante un evento anómalo de precipitaciones.

Dado que en el área de estudio durante los eventos húmedos se produce fuerte evaporación, las imágenes radar son metodologías apropiadas en la determinación de áreas inundadas, detección de humedales, entre otros. Otros autores destacan la importancia de la sinergia entre sensores activos y pasivos para la detección de estas unidades ambientales y su tipología ante eventos de inundaciones (Anusha y Bharathi, 2019; Mahdianpari et al., 2019). Es por ello que se resalta la importancia de incluir imágenes radar dado a las características de su onda que proporciona ventajas en el monitoreo de inundaciones frente a imágenes ópticas.

Por otra parte, se debe considerar que las diferencias entre las áreas detectadas por las polarizaciones se deben a las características de la señal referidas a su tipo de transmisión y recepción que hacen referencia a diferentes fuerzas de dispersión. El carácter despolarizante de la vegetación difiere según la estructura de la vegetación, la distribución de la biomasa y el estado de las inundaciones (Henderson, 2008; Morandeira et al., 2016). En este sentido, las señales VV están relacionadas con la dispersión de la superficie rugosa (Veloso et al., 2017), mientras que la VH suele ser más sensible a los dispersores de volúmenes (Brown et al., 2000).

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio poseen potencialidad para determinar sectores de humedales bajo un enfoque ecohidrogeomórfico en circunstancias anómalas. El conocimiento del área de estudio mediante sus cualidades estructurales y la presencia y/o ausencia de biomasa son oportunas para definir aquellos sectores que son contenedores del ingreso de agua al sistema. Los cambios biofísicos evidencian los aspectos funcionales de los humedales y permite observar el desarrollo de la hidrodinámica de la laguna hacia áreas transicionales entre el humedal acuático de laguna Alsina y su franja lacustre y los humedales terrestres.

Es importante destacar la información que propicia una metodología complementaria entre sensores activos y pasivos que permitió evaluar la respuesta del ambiente ante un evento de inundación. Se destaca que los datos del sensor pasivo permiten relacionarse con datos ópticos y la cantidad de precipitaciones.

Los resultados de este trabajo son de gran utilidad para el manejo hídrico del área y aporta conocimiento sobre las cualidades adaptativas del ambiente frente a un evento extraordinario de inundación que es una fuerza determinante en los cambios y alteraciones en el paisaje. Además, contribuye a definir tipologías de humedales que en estudios posteriores serán vinculados en el marco de la valoración ecológica de sus bienes y servicios.

Agradecimientos

El trabajo pertenece al Proyecto de Investigación PGI: “Aplicación de Tecnologías de la información Geográfica al estudio integral y comparativo de problemáticas ambientales. Segunda Parte”. Los autores agradecen a los revisores anónimos sus comentarios, observaciones y sugerencias que han contribuido a mejorar la versión final del trabajo y al Laboratorio de Geotecnologías del Departamento de Geografía y Turismo de la Universidad Nacional del Sur por su colaboración para el procesamiento de las imágenes satelitales.

Contribución de autorías

Vidal Quini Nicolás Emanuel conceptualización original, investigación, cartografía, confección y revisión del trabajo. Alejandra Mabel Geraldí investigación, confección y revisión de trabajo.

Financiación

Este trabajo ha sido posible gracias al proyecto de investigación “Aplicación de Tecnologías de la información Geográfica al estudio integral y comparativo de problemáticas ambientales. Segunda Parte” financiado por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur.

Conflicto de intereses

El autor y autora de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses.

Bibliografía

- Acreman, M., & Holden, J. (2013). How Wetlands Affect Floods. *Wetlands*, 33(5), 773–786. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0473-2>
- Anusha, N., & Bharathi, B. (2019). Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, Volume 23, Issue 2, Pages 207–219, ISSN 1110-9823. doi: 10.1016/j.ejrs.2019.01.001
- Balmaceda P. (1951). Informe preliminar sobre laguna Epecuén. Pcia. De Buenos Aires. Ministerio de Industria y Comercio de la Nación. Dirección Nacional de minería. 29 pp. Recuperado de <http://repositorio.segemar.gov.ar/308849217/1553>
- Bolanos, S., Stiff, D., Brisco, B., Pietroniro, A. (2016). Operational Surface Water Detection and Monitoring Using Radarsat 2. *Remote Sensing* 8, no. 4: 285. <https://doi.org/10.3390/rs8040285>
- Brinson, M.M. (1993). A hydrogeomorphic classification for wetlands. U.S. Army Corps of Engineers, Technical Report WRP – DE – 4. Washington, D.C. EE.UU. Retrieved from fwf.ag.utk.edu/mgray/wfs560/Brinson1993.pdf
- Brown, S.; Cookmartin, G.; Morrison, K.; McDonald, A.J.; Quegan, S.; Anderson, C.; Cordey, R.; Dampney, P. (2000). Wheat scattering mechanisms observed in near-field radar imagery compared with results from a radiative transfer model. In *Proceedings of the IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment (IGARSS 2000)*, Honolulu, HI, USA, 24–28; pp. 2933–2935. doi: 10.1109/IGARSS.2000.860295
- Cordini, I.R. (1942). Laguna La Brava, Provincia de Buenos Aires: contribución a su conocimiento limnológico. (Tesis de Doctor). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Recuperado de http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_0281_Cordini.pdf
- Clement, M., Kilsby, C. and Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *J Flood Risk Management*, 11: 152-168. doi:10.1111/jfr3.12303
- Chaouch, N., Temimi, M., Hagen, S., Weishampel, J., Medeiros, S., & Khanbilvardi, R. (2011). A synergetic use of satellite imagery from SAR and optical sensors to improve coastal flood mapping in the Gulf of Mexico. *Hydrological Processes*, 26(11), 1617–1628. doi:10.1002/hyp.8268
- DeVries, B., Huang, C., Lang, M., Jones, J., Huang, W., Creed, I., & Carroll, M. (2017). Automated Quantification of Surface Water Inundation in Wetlands Using Optical Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 9(8), 807. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs9080807>
- Di Bella, C.M., Posse, G., Beget, M.E., Fischer, M.A., Mari, N., & Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas* 17(3):39-52. doi: 10.7818/re.2014.17-3.00
- Domeneghetti, A., Schumann, G. J.-P., & Tarpanelli, A. (2019). Preface: Remote Sensing for Flood Mapping and Monitoring of Flood Dynamics. *Remote Sensing*, 11(8), 943. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11080943>
- Falasca, S., Zabala, S., Bernabé, M., Ulberich, A., & López, R. (1995). Estudios de las Causas Naturales Determinantes de las Inundaciones en el Centro Oeste de la Provincia de Buenos Aires, República Argentina. *Revista Geográfica*, (122), 83-103. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/40993146>
- Gayol, M. P., Morandera, N. S., & Kandus, P. (2018). Dynamics of shallow lake cover types in relation to Paraná River flood pulses: assessment with multitemporal Landsat data. *Hydrobiologia* 833, 9–24. doi: 10.1007/s10750-018-3847-x
- Geraldi, A. M. (2009). Estudio geoambiental de la cuenca lagunar las encadenadas del oeste. (Tesis doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. Recuperada de <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/2233>.
- Geraldi, A., Piccolo, M., & Perillo, G. (2010). Anomalías de precipitación y temperatura en Las Encadenadas del Oeste. Buenos Aires, Argentina. *Revista Geográfica*, (148), 137-149. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/40996833>
- Geraldi, A., Piccolo, M.C. & Perillo, G. (2011). El rol de las lagunas bonaerenses en el paisaje pampeano. *Asociación Civil Ciencia Hoy. Ciencia Hoy*; 21; 123; 8-2011; 9-14. Recuperada de <http://hdl.handle.net/11336/21369>
- Green, A.J., Alcorlo, P., Peeters, E.T., Morris, E.P., Espinar, J.L., Bravo-Utrera, (...); Mateo, R. (2017). Creating a safe operating space for wetlands in a changing climate. *Front. Ecol. Environ*, 15, 99–107. <https://doi.org/10.1002/fee.1459>

- Gulácsi, A., & Kovács, F. (2020). Sentinel-1-Imagery-Based High-Resolution Water Cover Detection on Wetlands, Aided by Google Earth Engine. *Remote Sensing* 12, no. 10: 1614. <https://doi.org/10.3390/rs12101614>
- Henderson, F.M. & Lewis, A.J. (2008). Radar detection of wetland ecosystems: A review. *Int. J. Remote Sensing* 29, 5809–5835. <https://doi.org/10.1080/01431160801958405>
- Kandus, P., Karszenbaum, H., Pultz, T., Parmuchi, G., & Bava, J. (2001). Influence of Flood Conditions and Vegetation Status on the Radar Backscatter of Wetland Ecosystems. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(6), 651–662. <https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854907>
- Kandus, P., Quintana, R., Minotti, P., Oddi, J., Baigún, C., Gonzalez Trilla, G. y D. Ceballos. (2010). Ecosistemas de humedal y una perspectiva hidrogeomórfica como marco para la valoración ecológica de sus bienes y servicios. In: Laterra, P., Jobbagy, E. y J. Paruelo (eds.): *Valoración de servicios ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial*. Ediciones INTA 11: 264-291.
- Kandus P., Minotti P., Morandaira N., Grimson R., González Trilla G., González E.B., San Martín L. & Gayol M.P. (2018). Remote sensing of wetlands in South America: status and challenges. *International Journal of Remote Sensing*, 39:4, 993-1016. doi: 10.1080/01431161.2017.1395971
- Kandus, P. & Minotti, P. (2019a). Propuesta de un marco conceptual y lineamientos metodológicos para el Inventario Nacional de Humedales Informe Final. doi: 10.13140/RG.2.2.33517.95201.
- Kandus, P. & Minotti, P. (2019b). Conceptos y enfoques metodológicos para un inventario de humedales a escala nacional: el paisaje como organizador. *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes* 9(1): 84-89 Volumen Especial VII Jornadas y IV Congreso AEP: “Paisajes de cambio: la planificación posible y el consumo de suelos”. Recuperado de [https://asadep.com.ar/_files/200000102-a9dc7a9dc9/21_Kandus_CAEP_inventario%20\(1\).pdf](https://asadep.com.ar/_files/200000102-a9dc7a9dc9/21_Kandus_CAEP_inventario%20(1).pdf)
- Lin, Y.N.; Yun, S., Bhardwaj, A., Hill, E.M. (2019). Urban Flood Detection with Sentinel-1 Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar (SAR) Observations in a Bayesian Framework: A Case Study for Hurricane Matthew. *Remote Sensing* 11, no. 15: 1778. <https://doi.org/10.3390/rs11151778>
- Liu, J., Xu, Z., Chen, F., Chen, F., & Zhang, L. (2019). Flood Hazard Mapping and Assessment on the Angkor World Heritage Site, Cambodia. *Remote Sensing*, 11(1), 98. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11010098>
- Long S., Fatoyinbo T.E. & Policelli F. (2014). *Flood extent mapping for Namibia using change detection and thresholding with SAR. Environmental Research Letters, Volume 9, Number 3, Focus on African Environmental Processes and Water – Cycle Dynamics*. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035002>
- Mahdianpari, M.; Salehi, B.; Mohammadimanes, F.; Homayouni, S. & Gill, E. (2019). The First Wetland Inventory Map of Newfoundland at a Spatial Resolution of 10 m Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Data on the Google Earth Engine Cloud Computing Platform. *Remote Sensing* 11, 43. <https://doi.org/10.3390/rs11010043>
- Malagnino E. C. (1988). Evolución del sistema fluvial de la provincia de Buenos Aires desde el Pleistoceno hasta la actualidad. *Segundas Jornadas Geológicas bonaerenses. Bahía Blanca*, 201 – 211.
- Maleki, S., Baghdadi, N., Soffianian, A., El Hajj, M., & Rahdari, V. (2019). Analysis of multi-frequency and multi-polarization SAR data for wetland mapping in Hamoun-e-Hirmand wetland. *International Journal of Remote Sensing*, 1–26. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1688414>
- Manzo, L. M.; Epele, L. B.; Grech, M. G.; Kandus, P. y Miserendino, M. L. (2018) Patrones de distribución de las comunidades de humedales patagónicos a una escala de paisaje. En: E. M. Abraham; R. D. Quintana y G. Mataloni (eds.). *Aguas + Humedales*. (pp 390-399). 1a ed. San Martín: Universidad Nacional de San Martín (UNSAM Edita).
- Matteucci S. (2012). Ecorregión Pampa. Pp 391-446, en: *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos* (Morello J., Matteucci S., Rodríguez A. y Silva M. eds.). Ed. Orientación Gráfica, Buenos Aires. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Silvia-Matteucci-2/publication/268447997_Ecorregion_Pampa/links/54f608650cf2ca5efefcdace9/Ecorregion-Pampa.pdf
- Miraglia, M. (1996). Diagnóstico ambiental de la Cuenca de las Encadenadas del oeste de la Pcia. de Buenos Aires. Bases históricas preliminares para el manejo de los recursos naturales del partido de Adolfo Alsina (Pcia. de Buenos Aires). Recuperado de http://www.rubenprofe.com.ar/11misc/Historia_ambiental.pdf
- Monachesi A. (1995). Las inundaciones en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina: Un problema de actores y estrategias. *Revista Semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina* 5:1–9. Recuperado de <https://www.desenredando.org/public/revistas/dys/rdys05/dys5-1.0-liespbba.pdf>

- Montgomery, JS, Hopkinson, C, Brisco, B, Patterson, S, Rood, SB. (2018). Wetland hydroperiod classification in the western prairies using multitemporal synthetic aperture radar. *Hydrological Processes*. 32: 1476– 1490. <https://doi.org/10.1002/hyp.11506>
- Morandeira, N., Grings, F., Facchinetti, C. & Kandus, P. (2016). Mapping plant functional types in floodplain wetlands: An analysis of C-band polarimetric SAR data from RADARSAT-2. *Remote Sensing*. 8. 1-17. doi:10.3390/rs8030174.
- Mulvany, S.; Canciani, M.; Pérez Safontas, M.; Sánchez Actis, T.; Tangorra, M.; Sahade, E. (2019). Inventario de humedales de la provincia de Buenos Aires: Nivel 2: Sistemas de paisajes de humedales: principales aspectos operativos y metodológicos para su abordaje. XXI Jornadas de Geografía de la UNLP, 9 al 11 de octubre de 2019, Ensenada, Argentina. Construyendo una Geografía Crítica y Transformadora: En defensa de la Ciencia y la Universidad Pública. EN: Actas. Ensenada: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Recuperado de http://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_eventos/ev.13601/ev.13601.pdf
- Inventario de humedales de la provincia de Buenos Aires. (2019). Sistemas de Paisajes de Humedales. Primer Informe: Aspectos metodológicos, identificación y delimitación. Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible. (OPDS). Recuperado de https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/inh_propuesta_de_marco_conceptual.pdf
- Paloscia, S., Pettinato, S., Santi, E., Notarnicola, C., Pasolli, L., & Reppucci, A. (2013). Soil moisture mapping using Sentinel-1 images: Algorithm and preliminary validation. *Remote Sensing of Environment*, 134, 234–248. doi:10.1016/j.rse.2013.02.027
- Peiman, R., Ali, H., Brisco, B., & Hopkinson, C. (2017). Performance evaluation of sar texture algorithms for surface water body extraction through an open source python-based engine. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. doi:10.1109/igarss.2017.8127660
- Quirós, R., A. Rennella, M. Boveri, J. Rosso & A. Sosnovsky. (2002). Factores que afectan la estructura y funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral* 12: 175-185. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/317539498_Factores_que_afectan_la_estructura_y_el_funcionamiento_de_las_lagunas_pampeanas
- Quirós, R. (2005). La ecología de las lagunas de las Pampas. *Investigación y Ciencia* 1: 1-13. Recuperado de <https://www.agro.uba.ar/users/quiros/Drafts/EcologiaLagunasPampas.pdf>
- Quirós, R., M.B. Boveri, C.A. Petracchi, A.M. Rennella, J.J. Rosso, A. Sosnovsky y H.T. von Bernard. (Eds.). (2006). Los efectos de la agriculturización del humedal pampeano sobre la eutrofización de sus lagunas (p: 1-16). En J.G. Tundisi, T. Matsumura-Tundisi, C. Sidagis Galli. *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gerenciamento e controle*, Instituto Internacional de Ecología, Instituto Internacional de Ecología e Gerenciamento Ambiental, Academia Brasileira de Ciências, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Inter - Academy Panel on International Issues, InterAmerican Network of Academies of Sciences. 531p. Recuperado de <https://www.agro.uba.ar/users/quiros/Eutrofizacion/Quirosetal2006EUTROSUL.pdf>
- Rodríguez, L., García, D., Ramonell, C., Veizaga, E., Graciani, S., Giraudo, A., Mihura, E. y Arzamendia, V. (2019). "Inventario de humedales en sitios pilotos: subcuenca del a° Yaguari, provincia de Corrientes, Argentina". Conference: VIII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la hidrología subterránea At: Salta, Argentina. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/333024380_INVENTARIO_DE_HUMEDALES_EN_SITIOS_PILOTOS_SUBCUENCA_DEL_A_YAGUARI_PROVINCIA_DE_CORRIENTES_ARGENTINA
- Rubio, M. C., Abraham, E., Quintana, R.D. (2018). Inventario de humedales en tierras secas y valoración de sus servicios ecosistémicos: el caso de los humedales de la cuenca del río Blanco. En: Universidad Nacional de San Martín y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC). Programa Futuros: Escuela de Posgrado: Agua + Humedales. (Serie Futuros). Buenos Aires: UNSAM Edita. Recuperado de <http://ri.unsam.edu.ar/bitstream/123456789/946/1/PFAH%202018%20TRMCAEQRD.pdf>
- San Martín, L., Morandeira, N., Grimson, R. & Kandus, P. (2018). Clasificación y mapeo de humedales según su hidropériodo en el marco de un inventario de humedales: el caso de la llanura costera de Ajó-Samborombón. En: Universidad Nacional de San Martín y Fundación Innovación Tecnológica (FUNINTEC). Programa Futuros: Escuela de Posgrado: Agua + Humedales. (Serie Futuros). Buenos Aires: UNSAM Edita. Recuperado de <https://ri.unsam.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/947/PFAH%202018%20TSMMGK.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Salvia, M., Karszenbaum, H., Kandus, P. & Grings, F. (2009). Datos satelitales ópticos y de radar para el mapeo de ambientes en macrosistemas de humedal. *Asociación Española de Teledetección. Revista de Teledetección*; ISSN: 1988-874031; 31: 35-51. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/20682>

- Salvia M., Grings F., Barraza V., Perna P., Karszenbaum H. & Feirazzoli P. (2012). Active and passive microwave systems in the assessment of flooded area fraction and mean water level in the Paraná River floodplain. 12th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad), Rome, Italy, 2012, pp. 1-4. doi: 10.1109/MicroRad.2012.6185239.
- Semeniuk, V. & Semeniuk, C. A. (1997). Geomorphic approach to global classification for natural inland wetlands and rationalization of the system used by the Ramsar Convention – a discussion. *Wetlands Ecology and Management* 5, 145–158. <https://doi.org/10.1023/A:1008207726826>
- Sevillano Rodríguez M. E., Bravo Peña L. C., Alatorre Cejudo L. C., & Salcedo Hurtado E. de J. (2020). Identificación de zonas de inundación a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos de inundación: caso de estudio Santiago de Cali, Colombia. *Cuadernos Geográficos*, 59(2), 308-329. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v59i2.9641>
- Slagter B., Tsendbazar N., Vollrath A., Reiche J. (2020). Mapping wetland characteristics using temporally dense Sentinel-1 and Sentinel-2 data: A case study in the St. Lucia wetlands, South Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Volume 86, 102009, ISSN 0303-2434. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102009>.
- Stewart, R. E., & Kantrud, H. A. (1971). Classification of natural ponds and lakes in the glaciated prairie region. Resource Publication 92 (p. 57). Washington, D.C.: Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, U.S. Fish and Wildlife Service. Retrieved from <https://pubs.er.usgs.gov/publication/rp92>
- Tiner, R.W., Lang, M.W., & Klemas, V.V. (Eds.). (2015). *Remote Sensing of Wetlands: Applications and Advances* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18210>
- Veloso, A., Mermoz, S., Bouvet, A., Toan, T.L., Planells, M., Dejoux, J.F. & Ceschia, E. (2017). Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment*, Volume 199, 2017, Pages 415-426, ISSN 0034-4257. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.015>.
- Yuan, T., Lee, H. & Jung, H.C. (2015). Toward Estimating Wetland Water Level Changes Based on Hydrological Sensitivity Analysis of PALSAR Backscattering Coefficients over Different Vegetation Fields. *Remote Sensing* 7, no. 3: 3153-3183. <https://doi.org/10.3390/rs70303153>
- Zhang, M., Li, Z., Tian, B., Zhou, J., & Tang, P. (2016). The backscattering characteristics of wetland vegetation and water-level changes detection using multi-mode SAR: A case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 45, 1–13. doi:10.1016/j.jag.2015.10.001