




ARTÍCULO

CARTOGRAFÍA DE PAISAJES Y ZONIFICACIÓN DE INUNDACIONES EN LA PLANICIE DEL RÍO SANTA LUCÍA, (CORRIENTES, ARGENTINA)

Landscape mapping and flood zoning in the Santa Lucía floodplain (Corrientes, Argentina)

Blanco, A. R. ^{1*} , Casco, S. L. ^{1 2}  & Salvia, M. M. ³ 

RESUMEN: La dinámica pulsátil condiciona las características, la permanencia y distribución del paisaje fluvial y la ocupación urbana. En este trabajo se cartografiaron las unidades de paisaje en la llanura de inundación de un tramo del río Santa Lucía, perteneciente a la cuenca del Río Paraná, generándose mapas con los atributos del pulso hidrosedimentológico para distintas unidades de paisaje. Se realizaron relevamientos planialtimétricos y se clasificaron las unidades de paisaje utilizando el sistema de Clasificación Ecológica de Tierras cartografiándolas mediante clasificación supervisada. Con el software Pulso se calcularon los atributos FITRAS para cada unidad de paisaje que fueron resumidos, explicados y agrupados de acuerdo con las similitudes y diferencias, utilizando métodos de análisis multivariado. Se realizaron mapas de atributos de pulso estableciendo 4 categorías de acuerdo con la correlación y similitud entre éstos. A través del mapeo se determinó que la vegetación mantiene un determinado patrón de organización en cada tramo del río, los árboles, arbustos y hierbas ocupan distintas posiciones en el gradiente topográfico, permaneciendo la mayor parte del año en aguas altas las lagunas, las playas, las barras de arena los bañados con pastos cortos, con hierbas altas y tiernas y en aguas bajas los bañados con arbustos, con pastos altos y duros y con palmas y los bosques dominados por una especie y los pluriespecíficos. Las similitudes y diferencias en

1 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura (UNNE).


2 Centro de Ecología Aplicada del Litoral (CONICET-UNNE).

3 Instituto de Astronomía y Física del Espacio (CONICET-UBA).

* Autor de correspondencia. Alicia Roxana Blanco. E-mail: agrim.blancoalicia@gmail.com

Como citar este artículo: Blanco, A. R., Casco, S. L. & Salvia, M. M. (2024). Cartografía de paisajes y zonificación de inundaciones en la planicie del río Santa Lucía, (Corrientes, Argentina). *Revista FACENA* 34(1), 37-62. Doi: <https://doi.org/10.30972/fac.3417405>

Recibido/Received: 29/12/2023. Revisión: 19/02/2024. Aceptado/Accepted: 29/02/2024.

Editor asociado: Félix Ignacio Contreras 

Publicado en línea: 20/05/2024. ISSN 1851-507X en línea.

la distribución de estas unidades de paisaje, permitió la elaboración del mapa de zonificación de las inundaciones. Con la correspondencia entre los paisajes de la planicie de inundación, el régimen de pulsos y el procesamiento de imágenes satelitales, se dispone de una herramienta útil para la gestión de inundaciones.

PALABRAS CLAVE: régimen de pulsos, clasificación supervisada, ciudades inundables, ríos de llanura.

SUMMARY: The pulsating dynamics condition the characteristics, permanence and distribution of the river landscape and urban occupation. In this work, the landscape units in the flood plain of a section of the Santa Lucia River, belonging to the Paraná River basin, were mapped with the attributes of the hydrosedimentological pulse for different landscape units. Planimetric surveys were carried out and the landscape units were classified using the Ecological Land Classification system and mapped using supervised classification. Using Pulso software, FITRAS attributes were calculated for each landscape unit. which were then summarized, explained and grouped according to similarities and differences, using multivariate analysis methods. Maps of pulse attributes were made establishing 4 categories according to the correlation and similarity between them. Through the mapping it was determined that the vegetation maintains a certain pattern of organization in each section of the river, the trees, shrubs and herbs occupy different positions in the topographic gradient, remaining most of the year in high water (lakes), sand bars, marshes with short and tall grasses, and in low water, marshes with shrubs, marshes with tall grasses and palms and forests dominated by one species and mixed riparian forests. The similarities and differences in the distribution of these landscape units allowed the development of the flood zoning map. Matching the landscape of the flood plain with the pulse rate and processing of satellite images provides a useful tool for flood management.

KEY WORDS: pulse regime, supervised classification, flooded cities, plains rivers.

INTRODUCCIÓN

La estructura y funcionamiento de los ríos con planicie de inundación están fuertemente condicionados por los pulsos de inundación (Junk *et al.*, 1989) o, más precisamente, pulsos hidrosedimentológicos (Neiff, 1990), que están conformados por dos fases complementarias: crecientes

(potamofases) y bajantes (limnofases). Estos pulsos regulan la estabilidad de los ecosistemas fluviales, incluyendo las poblaciones humanas (Neiff, 1990, 1996, 1999; Casco *et al.*, 2011; Marchetti y Aceñolaza, 2012), los procesos biogeoquímicos (Tabacchi *et al.*, 1998), la diversidad en los humedales ribereños (Neiff, 2001; Budke *et al.*, 2010; de Assis y Wittmann, 2011; Marchetti y Aceñolaza, 2012) y la distribución de los bosques fluviales en el gradiente topográfico (Casco *et al.*, 2010; Casco y Neiff, 2013, Neiff *et al.*, 2020).

Para el Bajo Paraná, tramo comprendido entre la confluencia del río Paraguay y la localidad de Diamante-Entre Ríos-(Neiff, 1990) se encontró una relación en el régimen de pulsos hidrosedimentológicos y la distribución de la vegetación en el gradiente topográfico, registrándose unidades de paisaje con predominio de vegetación herbácea en las zonas más bajas de la planicie de inundación, mientras que, en posiciones más altas del gradiente, se desarrolla la vegetación leñosa, con bosques de sauces y alisos en posiciones intermedias del gradiente y bosques mixtos en los albardones más altos (Casco, 2012).

Las llanuras de inundación desempeñan un rol fundamental en el funcionamiento de los sistemas fluviales, tanto como amortiguadores contra los efectos de las inundaciones y sequías extremas, como albergando especies animales y vegetales únicas y proporcionando servicios a las comunidades ribereñas: transporte, pesca y agricultura, entre otras. Caracterizar la dinámica fluvial permite interpretar y prever cambios naturales, intentando su manejo sostenible y gestionando adecuadamente eventos catastróficos que puedan ocurrir (Casco *et al.*, 2011).

Las inundaciones y sequías condicionan de distinta forma las actividades humanas en las cuencas, por lo tanto, al establecer la correspondencia entre los paisajes de la planicie de inundación y el régimen de pulsos, se puede disponer de una herramienta de gestión de inundaciones, debido al ajuste entre la estructura y distribución de la vegetación, la morfología del terreno y la variabilidad del clima, que resume el funcionamiento de los ríos en el tiempo en cada sector de la cuenca.

La dinámica pulsátil ha condicionado históricamente las características, la permanencia y distribución de los paisajes fluviales y la ocupación urbana. Sin embargo, recién desde la década del 90, las crecientes ocasionadas por el fenómeno de El Niño, han sido consideradas en series de largo término, analizando la respuesta de los sistemas naturales y la capacidad de adaptación de quienes soportan estos eventos: ecosistemas, ciudades, servicios (Schnack *et al.*, 1995).

La teledetección constituye una herramienta crítica para el monitoreo de la vegetación fluvial, debido a la extensión, complejidad y dificultad de acceso a estos ecosistemas (Morandeira, 2014). Por otra parte, teniendo en cuenta la disponibilidad de datos satelitales, aquellos correspondientes a la serie Landsat han sido utilizados frecuentemente, a través de distintos métodos de procesamiento entre los que se encuentra la clasificación (Aceñolaza *et al.*, 2005; Borgnia *et al.*, 2006; Cerdeira Estrada *et al.*, 2008; Salvia *et al.*, 2009). Las imágenes satelitales con mayor resolución espacial como las imágenes de la serie Landsat dan mejores resultados en las clasificaciones porque permite ver la segmentación en estos ambientes, distinguir el patrón de distribución de las unidades en el paisaje y analizarlas (Aceñolaza *et al.*, 2005). La clasificación supervisada se realizó con el método de clasificación de la máxima probabilidad, uno de los más utilizados en la clasificación de cobertura de suelo (Gómez *et al.*, 1997; Paolini *et al.*, 2002; Yuan *et al.*, 2005; Aguayo *et al.*, 2009; Meliadis y Meliadis, 2011). Por otra parte, la realización de cartografía es tarea fundamental del agrimensor, sumado a los conocimientos en el campo de la teledetección, geodesia, topografía, etc., permite delimitar la extensión espacial de las inundaciones utilizando estas herramientas y de esta manera contribuir a las tomas de decisiones respecto del ordenamiento territorial.

La provincia de Corrientes se caracteriza por su gran disponibilidad de recursos hídricos, con numerosos ríos interiores. En el sector occidental, las poblaciones se asientan sobre las lomadas arenosas, terrazas fluviales del paleocauce del río Paraná (Contreras y Contreras, 2017).

La cuenca del río Santa Lucía, afluente del río Paraná en Corrientes,

es una de las más significativas, tanto por su extensión como por su importancia socioeconómica, ya que es receptora de poblaciones y de actividades agrícolas gravitantes para la economía provincial, cubriendo entre 6200 y 8300 Km² (Currie y Giménez, 1998; Bohn y Campo, 2010).

Teniendo en cuenta que la cartografía de la llanura de inundación desde una perspectiva del paisaje fluvial provee una rigurosa base para conocer la distribución de la vegetación fluvial y, también, que aporta una herramienta para la gestión de inundaciones, es que, en esta contribución se plantearon los siguientes objetivos: 1. Elaborar la cartografía de las unidades de paisaje presentes en un tramo de la llanura de inundación del río Santa Lucía. 2. Determinar zonas de inundación en función de la similitud de los atributos de pulso, como herramienta para el ordenamiento del uso del territorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona de estudio corresponde a una sección del río Santa Lucía, en la provincia de Corrientes (entre 28°37'28" y 28°26'35" Latitud Sur y 58°49'20" y 58°35'37" Longitud Oeste), en el Dpto. de San Roque (Figura 1).

El clima es subtropical húmedo con temperatura promedio de 14°C en invierno y 24°C en verano y precipitaciones medias anuales en el orden de los 1400 mm (Pyszczek, 2016).

Esta zona, geomorfológicamente, integra la cuenca principal del Río Paraná (Currie y Giménez, 1998) y es una de las más significativas, tanto por su extensión como por su importancia socioeconómica, debido a que es receptora de poblaciones y de actividades agrícolas gravitantes para la economía provincial.

Fisiográficamente, la cuenca del río Santa Lucía se encuentra ubicada sobre el mega abanico aluvial del Paraná en la región denominada Triángulo de la capital, el cual se encuentra la mayoría de las lomadas arenosas (Bruniard, 1966; Contreras y Contreras, 2017). En esta región, el paisaje se

caracteriza por una ondulación impuesta por suaves lomadas de arenas puelchenses y valles sobre gredas araucanas por donde se abrieran paso los antiguos brazos del Paraná. Las lomadas alcanzan una altura de cinco metros con respecto al plano circundante y actúan como interfluvios que orientan los cursos de agua con un marcado paralelismo hasta el suroeste, la altura media general se ubica alrededor de los 70 metros, a excepción de zonas particularmente bajas. La vegetación general de este paisaje son las sabanas herbáceas sobre los elementos leñosos. Sus bosques son de tipo hidrófilo y, por excepción, xeromorfos (Carnevali, 1994).

La cuenca del río Santa Lucía tiene una pendiente escasa, con características morfométricas que atenúan los efectos negativos y la fuerza de las crecidas (Smichowski y Contreras, 2023). Las vías actuales de escurrimiento se ubican en antiguos cauces abandonados por el río Paraná, rellenos por sedimentos limo-arcillosos más modernos (Orfeo y Neiff, 2008).

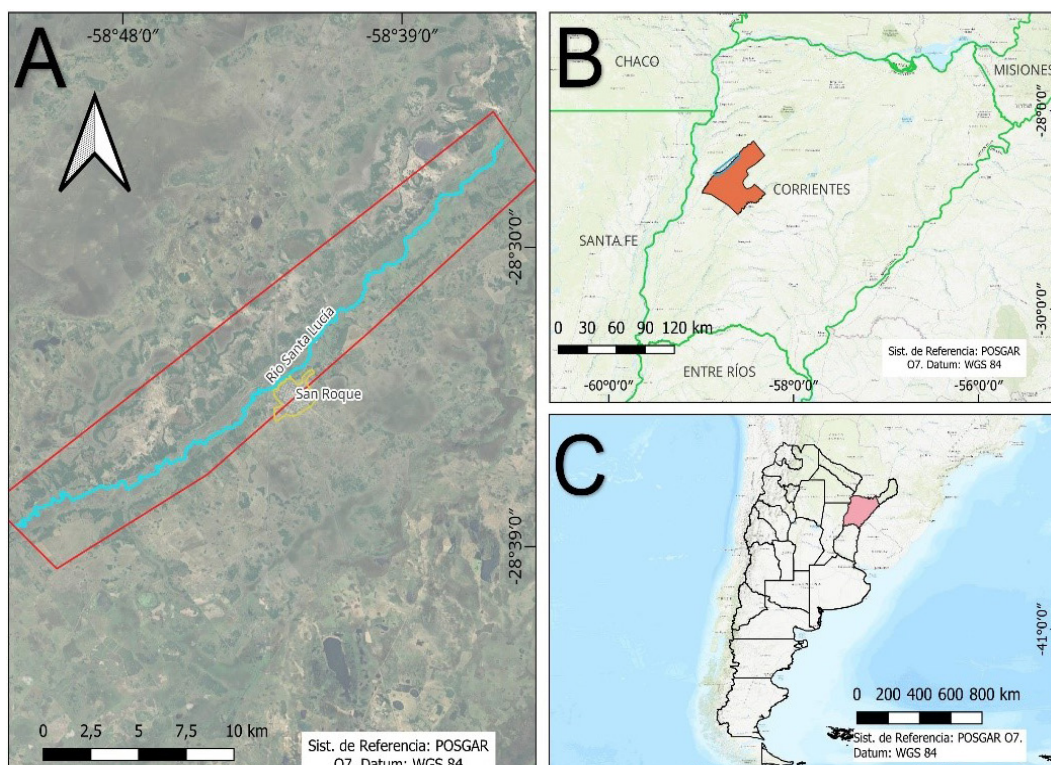


Fig. 1. Ubicación del área de estudio A) Río Santa Lucía a la altura del Departamento de San Roque. B) Departamento de San Roque dentro de la provincia de Corrientes. C) Ubicación de la provincia de Corrientes dentro de Sudamérica.

Relevamiento en Campo

Se realizaron reconocimientos en distintos sectores de la planicie de inundación del río Santa Lucía para identificar las unidades de paisaje presentes y su distribución. Cada estación de reconocimiento fue georreferenciada planialtimétricamente con receptor GPS South H66-H68, simple frecuencia y vinculada a la estación permanente RECO de la red RAMSAC (Red Argentina de Monitoreo Satelital Continuo) para el procesamiento de los datos. Las cotas fueron referidas al Sistema de Referencia Vertical Nacional 2016 (SRVN16).

Para la clasificación de las unidades de paisaje se utilizó el sistema de Clasificación Ecológica de Tierras -ELC- (FEARO, 1978), con las adaptaciones para paisajes fluviales realizadas por Casco (2003). Esta clasificación considera las relaciones temporales y espaciales entre los cinco componentes principales del paisaje: terreno, hidrología, clima, suelo y vegetación, identificando las superficies terrestres que poseen semejanzas en su paisaje y determinando zonas geográficas con diferente nivel de detalle que conforman el patrón de paisaje.

Procesamiento con el Software PULSO

Debido a que cada unidad de paisaje tiene distinta conectividad con el río, se utilizó el software PULSO (Neiff y Neiff, 2004) para determinar los atributos del pulso hidrosedimentológico (Frecuencia, Intensidad, Tensión, Regularidad, Amplitud y Estacionalidad) para cada unidad de paisaje, utilizando los niveles de desborde más frecuentes.

Se procesó la serie hidrológica 1975-2020, de los registros hidrométricos diarios del río Santa Lucía, obtenidos de la Dirección de Sistemas de Monitoreo de los Recursos Hídricos, a través de Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica: <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/base-de-datos-hidrologica-integrada>.

Con los datos obtenidos con PULSO se calculó, para cada unidad de paisaje, el Cociente de Conectividad Fluvial (FCQ) el cual es obtenido con la siguiente fórmula (Neiff y Poi, 2003):

$$FCQ = FD/ID$$

donde FD= número de días de inundación (potamofase) e ID= número de días aislados (limnofase).

Clasificación Supervisada y mapeo de las unidades de paisaje

Con la información obtenida en campo y utilizando imágenes ópticas Landsat, se realizó una clasificación supervisada que permitió obtener un mapa de la distribución de los ambientes fluviales. Se estableció de diez a veinte regiones de interés (ROIs) por unidad de paisaje para estimar adecuadamente la variabilidad espectral de los distintos ambientes a identificar (Gong y Howarth, 1990), en áreas pequeñas para evitar los efectos de borde (Chuvieco, 2002). La clasificación supervisada se realizó con el método de clasificación de la máxima verosimilitud (Gómez *et al.*, 1997; Paolini *et al.*, 2002; Yuan *et al.*, 2005; Aguayo *et al.*, 2009; Meliadis y Meliadis, 2011).

Para el mapeo de las unidades de paisaje se utilizó una escena del sensor OLI de la misión Landsat 8, correspondiente al mes de marzo del año 2018, se eligió la estación de verano por tratarse de la mejor para el mapeo de ambientes (Salvia, 2010) y en aguas bajas debido a que es posible encontrar distintos parches de vegetación (Casco *et al.*, 2005). Antes de realizar la clasificación supervisada se probó la separabilidad de las categorías con los índices Jeffries-Matusita y Transformed Divergence, cuyos valores van entre 0 y 2. Un valor de más de 1,9 indica una buena separabilidad de una pareja de clases mientras que un valor de menos de 1 indica que dos clases no se pueden distinguir (Richards, 1999). Luego de la clasificación se utilizó una matriz de confusión y sitios de verificación para evaluar la exactitud de la clasificación y determinar la bondad del clasificador. Para una mejor visualización de los resultados se aplicó un filtro de mayoría, con ventana 3x3.

La imagen del sensor OLI se descargó desde el sitio web del Servicio

Geológico de los Estados Unidos -USGS- (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Se seleccionó la imagen con Nivel 2 de procesamiento, lo cual incluye calibración radiométrica. Para escalar la imagen de reflectancia al rango válido se utilizó ArcGis. Se convirtió la escena de 32 bits float a 8 bits enteros utilizando factor multiplicativo de 220.

Las correcciones geométricas se realizaron utilizando las cartas topográficas IGN (Martínez Aragonés y Moreno Burgos 1997; Sisti, 2015). Para todas las escenas Landsat se obtuvo un error cuadrático medio (RMS) menor a medio píxel (0,5) (López Polanco, 2011). El remuestreo se hizo con polinomio de 3er grado, y vecino más próximo (López Polanco, 2011; Marini *et al.*, 2007), con una precisión de 30 m.

Luego, utilizando la herramienta de valores únicos del software QGIS, se obtuvieron los porcentajes de cobertura del suelo de cada unidad de paisaje en las distintas zonas de estudio.

Los atributos de Pulso fueron interpolados a las demás unidades de paisaje resultantes de la clasificación, considerando que la longitud del tramo del río es tal que el nivel de desborde de un mismo ambiente, en una ubicación topográfica distinta tiene una variación mínima.

Análisis de los datos

Los resultados obtenidos del procesamiento con PULSO y los porcentajes de cobertura del suelo derivados de las clasificaciones de ambientes, se resumieron y explicaron con el análisis de componentes principales (CPs), utilizando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2020). Se procesaron los atributos del pulso hidroedimentológico (frecuencia, intensidad promedio, amplitud promedio, recurrencia en años, estacionalidad de las potamofases, estacionalidad de las limnofases, el número de días en potamofase, el número de días en limnofase), el FCQ y el porcentaje de ocupación del suelo para 10 unidades de paisaje de la llanura de inundación, sin incluir el curso principal.

Con el análisis de componentes principales (CPs) se redujo y agrupó la información de acuerdo a las similitudes de las variables que caracterizan a cada unidad de paisaje para luego realizar los mapas de atributos de Pulso.

Debido a que las variables están medidas en distinta escala o poseen diferente magnitud, se obtuvieron las componentes principales a partir de la matriz de correlación (matriz de covarianza de las variables originales centradas y escaladas), empleándose los datos estandarizados. La información resumida en los CPs, se representaron en gráficos Biplots.

Con la información generada para cada ambiente con el Análisis de Componentes Principales y, de acuerdo a las similitudes, se agrupó las variables que caracterizan a cada unidad de paisaje, para realizar los mapas de zonificación de inundaciones, identificándose áreas con distintas características de los atributos del pulso y estableciéndose 4 categorías: Zonificación 1, Zonificación 2, Zonificación 3 y Zonificación 4. Los mapas raster de las clasificaciones fueron convertidos en mapas vectoriales.

RESULTADOS

Clasificación del paisaje fluvial y atributos del pulso hidrosedimentológico

Se reconocieron las siguientes unidades de paisaje: curso principal (A1); lagunas (A2); playas (E); barras de arena (D); bañados: con pastos cortos (B1), con hierbas altas y tiernas (B2), con pastos altos y duros (B3); con arbustos (B4) y con palmas y arbustos (B6) y bosques: dominados por *Salix humboldtiana* o *Tessaria integrifolia* (F1) y pluriespecíficos (F2).

Las unidades de paisaje que permanecieron en potamofase la mayor parte del año fueron las lagunas (A2), las playas (E), las barras de arena (D), bañados con pastos cortos, y bañados con hierbas altas y tiernas (B1/B2). Las que estuvieron más tiempo con el suelo descubierto de agua (limnofase) fueron los bañados con hierbas altas y tiernas y arbustos (B2/B4), bañados con pastos altos y duros, bañados con arbustos (B3/B4), bañados con arbustos (B4), bosques inundables dominados por una especie (F1) y los bañados con palmas y arbustos (B6) y bosque pluriespecífico (F2).

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los atributos de pulso para cada unidad de paisaje.

Tabla 1. Atributos del pulso hidrosedimentológico en las unidades de paisaje de la planicie de inundación del río Santa Lucía durante el período 1975-2020. Unidades de paisaje: A2: lagunas; B1: bañado con pastos cortos; B2: bañado con plantas altas y tiernas, B3: bañados con pastos altos y duros; B4: bañados con arbustos; B6: bañados con palmas y arbustos; D: playas; E: bancos de arena; F1: bosques dominados por una especie (saucе y/o alisos); F2: bosques pluriespecíficos.

Unidades de paisaje	A2	B1/B2	B2/B4	B3/B4	B4	B6	D	E	F1	F2
Nivel de desborde (m.s.n.m)	38,49	33,56	37,72	34,95	52,34	52,84	33,68	33,38	52,77	54,19
Frecuencia	175	135	206	170	118	64	151	90	90	7
Intensidad promedio	19,53	17,4	19,23	17,75	26,23	26,31	17,00	16,96	26,26	23,79
Recurrencia	0,01	0,01	0,01	0,01	0,09	0,49	0	0	0,25	43,15
Amplitud promedio	91,03	120,15	78,55	93,69	134,77	248,46	107,17	180,29	176,69	2254,71
Estacionalidad Potamofase	abr, may, ene	nov, dic	abr, may, jun	abr, may	abr, may	abr, may	may, jun, dic	-	abr, may, dic	abr, may
Estacionalidad Limnofase	ago, sep, oct	mar, sep	sep, oct	ago, sep, oct	ago, sep, oct	-	ene, sep	mar, sep	-	-
Nº de días en potamofase	3659	13003	8434	3273	1448	671	11903	14770	1175	61
Nº de días en limnofase	12651	3307	7876	13037	14862	15639	4407	1540	15135	16249
FCQ	0,28	3,93	1,07	0,25	0,09	0,04	2,7	9,59	0,07	0,003

Clasificación supervisada y mapas de atributos de pulso

Las unidades de paisaje que tuvieron respuesta espectral similar (menos de 1,9), fueron agrupadas, de tal manera que las clases de información definidas para el mapa de unidades de paisaje fueron 7 (Figura 2). En este sentido, en la clase de información agua, se agruparon el curso del río (A1) y lagunas (A2); las unidades de paisaje barras de arena (D) y playas (E) fueron agrupadas en la clase *barras de arena/playas*; en la clase de información *bosques de una especie y palmas*, se unificaron los bosques dominados por sauces (F1) y los *bañados con*

palmas y arbustos (B6) y la clase de información *bañados con arbustos*, incluye estos bañados dispuestos en el paisaje con una separación de 3 a 10 metros, predominando la respuesta espectral del suelo franco arenoso con escasa vegetación herbácea. En la clase *bañados de hierbas altas, tiernas y arbustos*, se agruparon los bañados de pastos cortos y de hierbas altas y tiernas (B1/B2) y éstos últimos con los bañados con arbustos (B2/B4). Usando los ROIs reservados para la evaluación de la exactitud, en la clasificación de las imágenes, el índice Kappa fue de 95% y la exactitud general de la matriz de confusión fue de 96,58%.

Del análisis estadístico del mapa de clasificación, se obtuvieron los porcentajes de ocupación del suelo de cada unidad de paisaje distribuida en la zona de estudio: los Bosques dominados por sauces y los bañados de palmas ocuparon el 26%; los bañados con hierbas altas, tiernas y arbustos el 22%; los bañados con arbustos el 19%; los bosques pluriespecíficos el 16%; los bañados con pastos altos, duros y arbustos ocuparon el 9%; las barras de arena y playas el 4%; y la clase agua ocupó el 4% del área de estudio.

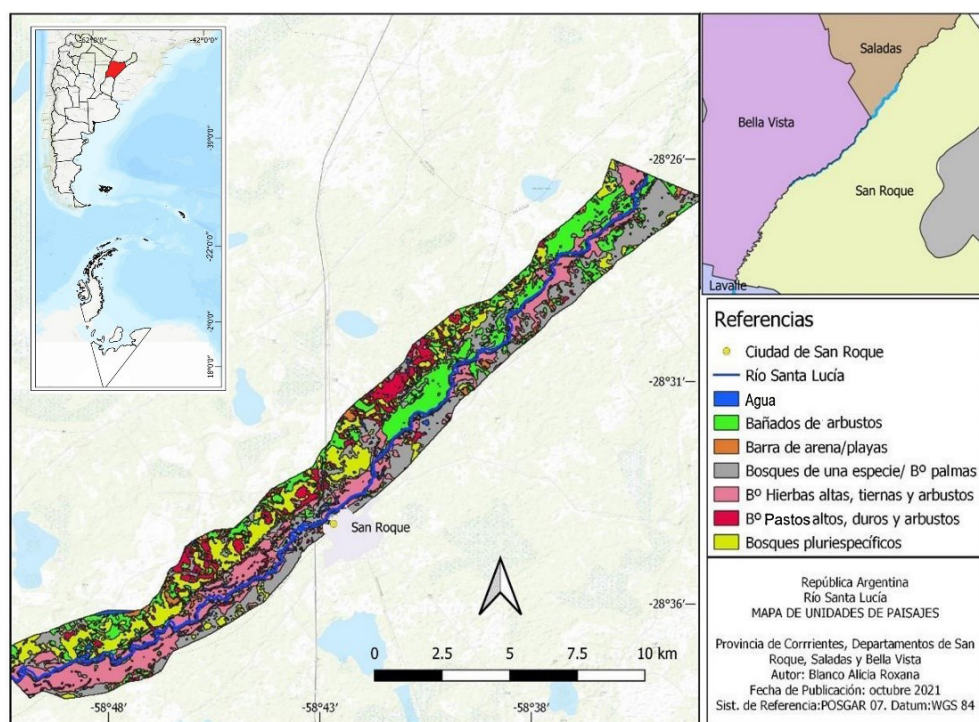


Fig. 2. Cartografía de Unidades de Paisaje para la zona de San Roque. “Bº” en las referencias significa “bañados”.

El análisis de componentes principales explicó el 79% de la variabilidad total de los datos (Figura 3). La primera Componente Principal (CP) explicó el 56,3% de la variabilidad total mientras que la segunda CP explicó el 22,7% de variabilidad total.

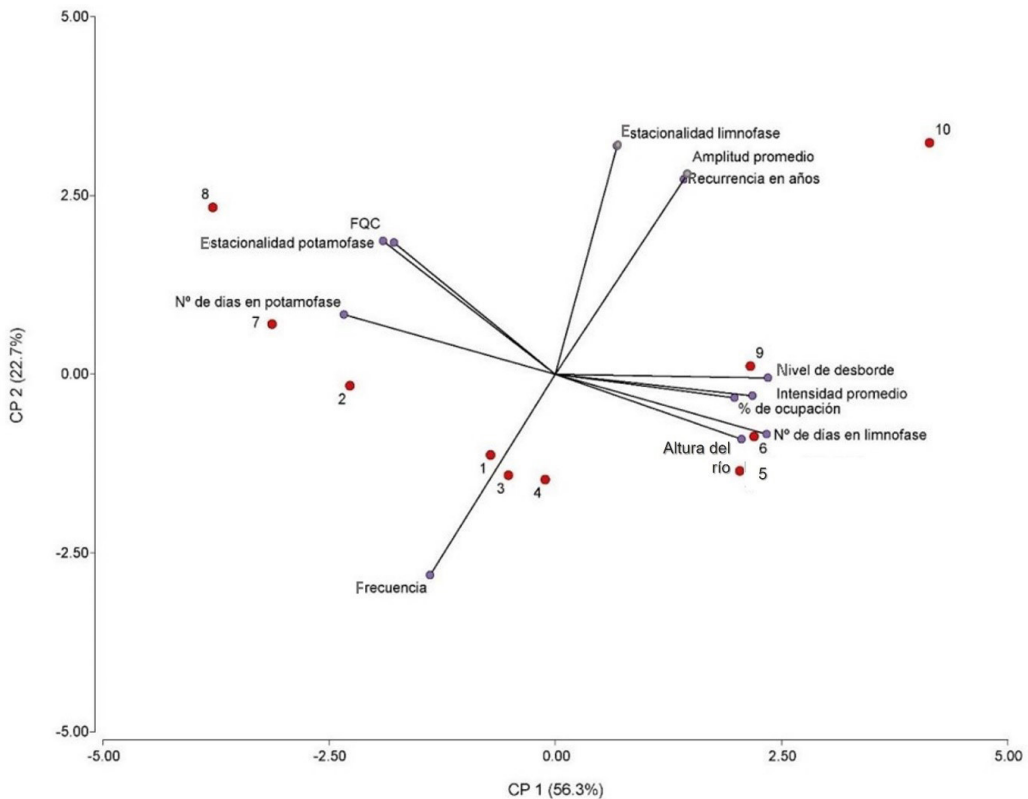


Fig. 3. Gráfico Biplot del Análisis de Componentes Principales sobre CP1 y CP2, de las variables consideradas: nivel de desborde, intensidad promedio, porcentaje de ocupación, número de días en limnofase y potamofase, altura del río, estacionalidad en limnofase y potamofase, amplitud promedio, recurrencia en años, frecuencia y FCQ. Los números corresponden a las unidades de paisajes: (1) lagunas, (2) Bañados con hierbas altas y tiernas, (3) Bañados con hierbas altas y arbustos, (4) Bañados con pastos altos, duros y arbustos, (5) Bañados con arbustos, (6) Bañados con palmas y arbustos, (7) Barras de arena, (8) Playas, (9) Bosques de sauce o aliso, (10) Bosques pluriespecíficos.

En el análisis de las variables y las unidades de paisajes en función de la orientación, y sobre las proyecciones en la primera CP, las barras de arena (7) y las playas (8) se caracterizaron por un mayor número de días y estacionalidad en potamofase, además de un valor FCQ alto. En menor medida, se relacionaron con estas variables los bañados con

pastos cortos y bañados con hierbas altas y tiernas (2). Por otra parte, los bosques pluriespecíficos se caracterizaron por tener un valor alto de recurrencia en años, una mayor estacionalidad en limnofase y una amplitud promedio más alta que el resto de las unidades de paisaje. Los bosques de sauce y/o aliso (9), los bañados con palmas y arbustos (6) y los bañados con arbustos (5), se caracterizaron por tener valores altos y similares en intensidad promedio, niveles de desbordes, números de días en limnofase y en porcentaje de ocupación del suelo; las lagunas (1), por su parte, presentaron mayor frecuencia de sequías. Por último, los bañados con hierbas altas y arbustos (3) y los bañados con pastos altos, duros y arbustos (4), son ambientes que permanecen secos la mayor parte del año, y se caracterizaron por tener una frecuencia mayor de inundación.

El análisis de las variables y casos en función de la orientación y sobre las proyecciones en la segunda CP, las variables más correlacionadas positivamente en el sentido sur fueron la estacionalidad de las potamofases con el FCQ y la estacionalidad de las limnofases con la amplitud promedio y la recurrencia.

A pesar de que la mayor variabilidad se explicó con la primera componente, los bosques pluriespecíficos también fueron explicados en la segunda componente como los ambientes con mayor estacionalidad de limnofases, mayor amplitud promedio y recurrencia, siendo ambientes con menor frecuencia de inundación.

En el mapa de zonificación de las inundaciones (Figura 4) se obtuvieron cuatro zonas que sintetizan las características de la dinámica pulsátil y la conectividad de cada ambiente fluvial con el curso del río.

- Zonificación 1: este grupo se formó por las barras de arena (7) y las playas (8), junto con los bañados de pastos cortos (2), son los ambientes que estuvieron mayor número de días en potamofase, por lo tanto, permanecieron la mayor parte del año inundados, sobre todo en verano, otoño e invierno (estacionalidad en potamofase). Presentaron un Cociente de Conectividad Fluvial (FCQ) alto, debido al mayor número de días en inundación.
- Zonificación 2: los bañados con hierbas altas y arbustos (3) y los bañados con pastos altos, duros y arbustos (4), son ambientes

que permanecieron secos la mayor parte del año además de tener una frecuencia mayor de inundación.

- Zonificación 3: Las unidades de paisajes como los bosques con dominancia de una especie (9), los bañados con palmas y arbustos (6) y los bañados con arbustos (5), se caracterizaron por tener un nivel de desborde similar, por lo tanto, la misma duración de la limnofase y con la misma intensidad promedio. Estos ambientes tuvieron una frecuencia media de inundación, entre 70 a 118 veces en el periodo de estudio. En el gráfico biplot, las variables características de estos ambientes formaron un ángulo obtuso con la frecuencia, sugiriendo una correlación negativa media.
- Zonificación 4: Los bosques pluriespecíficos, se caracterizaron por tener una estacionalidad y una amplitud mayor en limnofase, como se observa en la Figura 3, notándose la correlación negativa existente con la frecuencia de inundación.

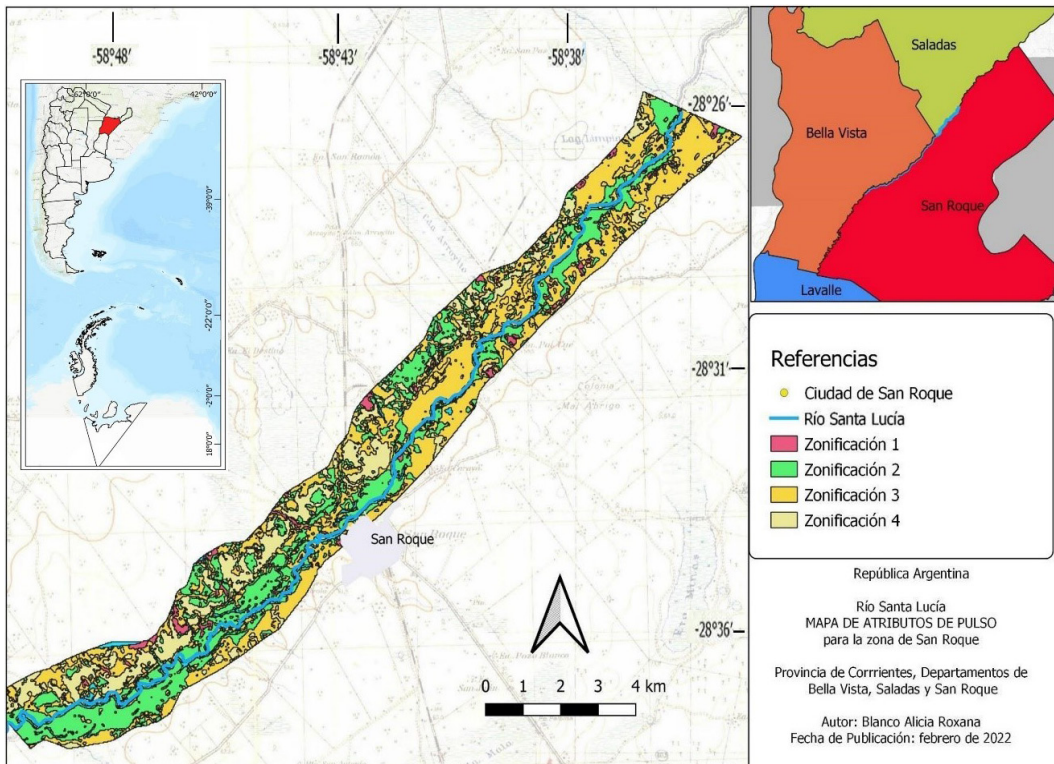


Fig. 4. Cartografía de zonificación de inundaciones para la zona de San Roque.

Los bañados de pastos cortos tuvieron las mismas características de la dinámica pulsátil que las playas y las barras de arena, por lo tanto, corresponderían a la zonificación 1, sin embargo, en la clasificación supervisada tomada de base, quedaron comprendidos en la zonificación 2 compartiendo la misma clase que los bañados con hierbas altas y arbustos.

DISCUSIÓN

En este trabajo, se evidenció que las unidades de paisaje de la llanura de inundación del río Santa Lucía mantienen un patrón de organización en cada tramo, situándose en distintos niveles de desborde con relación a su ubicación en el gradiente topográfico. Estos resultados, se corresponden con los encontrados en el río Paraná, registrándose bañados de hierbas tiernas en las partes más bajas de la planicie de inundación, bosques de sauces en albardones de posiciones intermedias) y bosques mixtos en albardones más altos (Casco, 2012).

Con el método de clasificación utilizado en este trabajo se obtuvieron resultados similares a los hallados por otros autores (Aceñolaza *et al.*, 2005; Borgnia *et al.*, 2006; Cerdeira Estrada *et al.*, 2008; Salvia *et al.*, 2009). Esto se debe a que las imágenes satelitales con mayor resolución espacial dan lugar a mejores resultados en las clasificaciones (a igual o similar resolución espectral, radiométrica y temporal) permitiendo distinguir la segmentación en estos ambientes, y el patrón de distribución de las unidades en el paisaje y analizarlas (Aceñolaza *et al.*, 2005). En cuanto a las precisiones generales e índices de Kappa, reflejan un buen desempeño al discriminar bien entre las clases de cobertura presentes. Estos resultados guardan relación con las precisiones obtenidas por Guzmán *et al.* (2023) y Dennis Pacheco *et al.* (2023) en clasificaciones realizada con imágenes Landsat.

El análisis multivariado permitió encontrar pautas de organización espacial facilitando la zonificación de inundaciones potencialmente distintas, resultando una contribución importante al conocimiento y, en consiguiente, al manejo de éstas. Esto contribuiría a lo realizado por otros autores, que han

caracterizado morfológicamente a la cuenca del río Santa Lucía para de determinar su respuesta hidrológica (Smichowski y Contreras, 2023)

La cartografía, además, permitió obtener información georreferenciada sobre la variabilidad hidrológica de cada sitio. Es a partir de estos conocimientos que se logrará establecer de manera pertinente la extensión de las inundaciones, para la protección de las actividades humanas, así como para la gestión de los recursos biológicos (Pouilly *et al.* 2004). Por lo tanto, si se establece la correspondencia entre los paisajes de la planicie de inundación y el régimen de pulsos, se puede disponer de una herramienta de gestión de inundaciones.

La zonificación de la llanura de inundación en función de los atributos de pulso para cada unidad de paisaje permitió obtener información georreferenciada sobre la variabilidad hidrológica de cada sitio. Barrantes Castillo y Vargas Bogantes (2011), realizaron una zonificación de amenazas por inundación basado en la identificación y clasificación de unidades geomorfológicas en el Valle del Río Sixaola. Por su parte, Sevillano Rodríguez (2020), realizó una zonificación de inundación en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia, siguiendo un método de evaluación multicriterio (EMC) en el cual se utilizaron siete variables de análisis (profundidad, acumulación de flujo, pendientes y distancia a canales, ríos, humedales y quebradas). En coincidencia con ambos trabajos, entendemos que las zonificaciones de las inundaciones son un paso muy importante hacia procesos de planificación y ordenamiento del territorio.

Gestionar la conservación de la vegetación de ribera constituye uno de los elementos fundamentales en la regulación de los procesos fluviales (Kutschker *et al.* 2020), por las significativas funciones ecosistémicas que cumplen (Pero *et al.* 2020).

En coincidencia con, Pero y Quiroga (2019), sugerimos tener en cuenta una perspectiva del paisaje para la toma de decisiones de gestión del ordenamiento ambiental del territorio. Mapear y evaluar el estado y la composición de las zonas ribereñas a través de diferentes unidades de paisaje permitirán llevar a cabo programas más precisos y eficientes

(Pero *et al.* 2020), debido a que el conocimiento del funcionamiento de las llanuras de inundación, permiten mejores tomas de decisiones para el ordenamiento del territorio.

CONCLUSIONES

Este trabajo permitió identificar 11 unidades de paisaje en un tramo de la llanura de inundación del río Santa Lucía, los cuales se sitúan en distintos niveles de desbordes (cotas) con relación a su ubicación en el gradiente topográfico.

Se calcularon los atributos FITRAS de los pulsos para los distintos niveles de desborde, asumiendo que, diferentes posiciones topográficas en distintos puntos de una planicie fluvial determinarán distintas frecuencias, intensidades y amplitudes de las fases de crecientes y bajantes. Por otra parte, con los datos de campos y utilizando imágenes ópticas Landsat, se realizó una clasificación supervisada que permitió obtener un mapa de la distribución de los ambientes fluviales.

Los atributos de pulso para cada unidad de paisaje, el cociente de conectividad fluvial y el porcentaje de ocupación del suelo fueron resumidas, explicadas y agrupadas utilizando estadística multivariada. Por último, se crearon mapas de los atributos de PULSO, que zonificaron áreas con distintas frecuencias, recurrencias de inundación, etc., estableciendo 4 categorías de acuerdo con la correlación y similitud entre los atributos de PULSO. Así, en la zonificación 1 de los mapas de atributos, se encuentran las barras de arena y playas, las cuales se caracterizan por estar mayor número de días en potamofase, por lo tanto, permanecen la mayor parte del año inundados, En la zonificación 2, se encuentran los bañados con hierbas altas y los bañados con pastos altos, duros y arbustos, que se caracterizan por tener una frecuencia mayor de inundación que el resto de las unidades de paisajes, Por otra parte, en la zonificación 3, se encuentran los bosques de una especie, los bañados con palmas y arbustos, y los bañados de arbustos, que se caracterizan por tener el mismo régimen hidrológico (limnofase), un nivel de desborde similar, lo que lleva a tener casi los mismos días en limnofase y con la misma intensidad promedio,

además de tener una frecuencia media de inundación. Por último, en la zonificación 4, se encuentran los bosques pluriespecíficos, son los ambientes que tienen una mayor recurrencia en años, una estacionalidad mayor en limnofase y una amplitud o duración larga en esta condición, son además, los ambientes con menor frecuencia de inundación.

Esto permitió evidenciar que, si se establece la correspondencia entre los paisajes de la planicie de inundación y el régimen de pulsos, se puede disponer de una herramienta de gestión de inundaciones, debido al ajuste entre la estructura y distribución de la vegetación, la morfología del terreno y la variabilidad del clima, que resume el funcionamiento de los ríos en el tiempo en cada sector de la cuenca. Esto, sumado a la utilización de las imágenes satelitales, permite evaluar espacialmente las inundaciones desde el conocimiento y las características de cada paisaje y su relación con el régimen de pulso hidrosedimentológico específico de las llanuras de inundación en ríos de llanura como el río Santa Lucía. En este sentido, es un aporte al conocimiento de la respuesta del paisaje al funcionamiento hidrológico de los ríos para la planificación del territorio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el PIP 11220130100293CO (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas). Agradecemos a los revisores anónimos que mejoraron nuestro manuscrito con sus valiosos comentarios.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

A.R.B., S.L.C. y M.M.S. desarrollaron la conceptualización del manuscrito. A.R.B. y S.L.C. realizaron las tareas de campo y el análisis con el software PULSO. A.R.B. y M.M.S. realizaron el procesamiento y análisis de imágenes satelitales, A.R.B. realizó las cartografías y escribió el primer borrador del manuscrito, con las contribuciones y revisiones de las otras autoras quienes leyeron y aprobaron el manuscrito final.

REFERENCIAS

- Aceñolaza, P., Sione, W., Kalesnik, F., y Serafini, C. 2005. Determinación de unidades homogéneas de vegetación en el Parque Nacional Pre-Delta (Argentina). *INSUGEO, Miscelánea*, 14, 81-90.
- Aguayo, M.; Pauchard, A.; Azócar, G.; Parra, O. 2009. Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural*: 82, 82(3), 361-374. doi:10.4067/S0716-078X2009000300004
- Barrantes Castillo, G., y J. Vargas Bogantes. 2011. «La zonificación de amanza por inundación como herramienta para el ordenamiento territorial en el valle del río Sixaola.» *Revista Geográfica de América Central* 1: 46:67-85
- Borgia, M. et al. 2006. Caracterización de la vegetación en la Reserva de Biosfera Laguna Blanca (Catamarca, Argentina). *Ecología Austral*, 16(1), 29-45.
- Bruniard, E. D. 1966. Bases Fisiográficas para una división regional de la provincia de Corrientes. *Revista Nordeste*. Facultad de Humanidades. UNNE, VIII, 7-79.
- Budke, J., Jarenkow, J., y Teixeira de Oliveira-Filho, A. 2010. Intermediary disturbance increases tree diversity in riverine forest of Southern Brazil. *Biodiversity and Conservation*, 19, 2371-2387.
- Camardelli, M. C., Miranda, S., y Córdoba, G. S. 2021. Cartografía de Unidades Ambientales Homogéneas (UAH): Un insumo para el ordenamiento del bosque chaqueño en Salta. *Ecología Austral*, 31, 420 - 430. doi:<https://doi.org/10.25260/EA.21.31.3.0.1245>
- Carnevali, R. 1994. Fitogeografía de la Provincia de Corrientes. Provincia de Corrientes - República Argentina: Gobierno de la Provincia de Corrientes - *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.
- Casco, S. L. 2003. Poblaciones vegetales centrales y su variabilidad espacio temporal en una sección del Bajo Paraná influenciada por el régimen de pulsos (Argentina). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste., Tesis Doctoral, 189p.

- Casco, S. L., N. I. Basterra de Chiozzi y J. J. Neiff. 2005. "La vegetacion como indicador de la Geomorfología Fluvial" *Revista Brasileira de Geomorfología*, Vol. 6, Nº 1: 123-136.
- Casco, S., J. Neiff, y A. Poi de Neiff. 2010. Ecological responses of two pioneer species to a hydrological connectivity gradient in riparian forests of the lower Paraná river. *Plant Ecol*, 209(1), 167-177.
- Casco, S. L., C. E. Natenzon, N. I. Basterra, y J. J. Neiff. 2011. Inundaciones en el Bajo Paraná ¿Se puede articular la gestión social a partir del comportamiento hidrológico previo? *Interciencia*, 36(6), 423-430.
- Casco, S. 2012. Influencia del régimen de pulsos sobre la vegetación del río Paraná.
- Casco, S.L. y J.J. Neiff. 2013. Distribution pattern of trees in a hydrological gradient below the Paraná-Paraguay River confluence. *American Journal of Plant Sciences. Special Issue: The Future of the forests*, 4 (3A): 663-673. doi: 10.4236/ajps.2013.43A085.
- Cerdeira Estrada, S., S. Lorenzo Sánchez, A. Areces Mallea, y C. Martínez Bayón. 2008. Mapping of the spatial distribution of benthic habitats in the Gulf of Batabanó using Landsat-7 images. *Ciencias Marina*, 34(2), 213-222.
- Chuvieco, E. 2002. Teledetección Ambiental . Barcelona : Ariel S.A.
- Contreras, F. I., & Contreras, S. A. 2017. La incidencia de la pendiente en la distribución de las morfologías de las lagunas sobre lomadas arenosas (Corrientes, Argentina). *Anuário do Instituto de Geociencias - UFRJ*, 40(1), 15-25. http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_15_25
- Currie, H. M., y J. E. Gimenez, 1998. Las Cuencas Hidricas de la Provincia de Corrientes potencial y recursos (recopilación). Corrientes: Cátedra de Hidrología Agrícola Facultad de Ciencias Agrarias - UNNE.
- de Assis, R., y F. Wittmann. 2011. Forest structure and tree species composition of the understory of two central Amazonian várzea forests of contrasting flood heights. *Flora*, 206, 251-260.

- Dennis Pacheco, S., J. R. Romo León, A. E. Castellanos Villegas, M. C. Peñalba Garmendia, y L. A. Cornejo Denman. «Composición de la vegetación tras el establecimiento de un área natural protegida en el noroeste de México.» *Revista Mexicana de Biodiversidad* 94 (2023).
- Di Rienzo, J., et al. 2020. InfoStat . Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina URL, <http://www.infostat.com.ar>.
- Dudgeon, D., et al. 2006. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biol Rev*, 81, 163-182. doi: <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>
- FEARO, E. 1978. Ecological land survey guidelines for environmental impact analysis. Ecological Land Classification Series. *Federal Environmental Assessment and Review Process*, 42 p.
- Gómez Domínguez, J. A., A. S. Merlín, y R. Peña Martínez. 1997. Detección de cambios en los humedales del río Jarama entre 1988 y 1992 y evaluación del estado trófico de las lagunas del Campillo, el porcal y las madres en 1992 mediante imágenes Landsat TM. . *VII Congreso Nacional de Teledetección*. Asociación Española de Teledetección. .
- Gong, P., y P. J. Howarth. 1990. An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 597-603.
- Guzmán, R., M. Bezada, y I. Rodríguez Santalla. «Cartografía de cobertura del suelo mediante datos de teledetección en la planicie de desborde del río Apure (Venezuela).» *Cuadernos de Investigación Geográfica*, nº 49 (2023): 113-137.
- Junk, W., P. Bayley y R. Sparks. 1989. The flood pulse concept in river floodplain systems. (D. Dodge, Ed.) *Large River*, 106(1), 110-127.
- Kutschker, A. M., G. Papazian, O. A. Martínez y N. Ibañez. 2020. Calidad de los bosques ribereños y perspectivas de restauración en un río de la Patagonia Andina, Argentina. *Ecología Austral*, 30(1), 1-165. doi:<https://doi.org/10.25260/EA.20.30.1.0.928>

- López Polanco, J. A. 2012. Teledetección de la vegetación del Páramo de Belmira con imágenes LANDSAT. *Dyna*, 79(7), 1-11.
- Marchetti, Z., y P. Aceñolaza. 2012. Pulse regime and vegetation communities in fluvial systems: the case of the Paraná River floodplain. *Flora*, 207(11), 795-804. doi:10.1016/j.flora.2012.09.004
- Marini, F. M., F. M. Vergara y H. Kruger. 2007. Determinación del uso de la tierra en el partido de Guamini (Argentina) mediante un estudio multitemporal con imágenes Landsat. *Revista de Teledetección*.
- Martinez Aragonés, S., y V. Moreno Burgos. 1997. Determinación de áreas susceptibles de inundación. Aplicación de la Teledetección. *VII Congreso Nacional de Teledetección*. Asociación Española de Teledetección.
- Meliadis, I. y M. Meliadis. 2011. Multi-temporal Landsat image classification and change analysis of land cover/use in the Prefecture of Thessaloiniki, Greece. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 1(1), 15-25.
- Morandeira, N.S., 2014. Tipos funcionales de plantas en humedales de la planicie de inundación del Bajo Río Paraná (Entre Ríos, Argentina) y su observación con datos polarimétricos de radar (Tesis de doctorado). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Neiff, J. J. 1990. Ideas para la interpretación Ecológica del Paraná. *Interciencia*, 15(6), 424-441.
- Neiff, J. 1996. Large rivers of South America: toward the new approach. *Verh. Internat. Verein. Limnol*, 26(1), 167-180. doi:https://doi.org/10.1080/03680770.1995.11900701
- Neiff, J. 1999. El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica. (A. I. Malvárez, Ed.) *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*, 97-146.
- Neiff, J. 2001. Diversity in some tropical wetland systems of South America. (J. W. Gopal B., Ed.) *Biodiversity in Wetlands: Assessment, Function and Conservation*, 2(1), 157-186.

- Neiff, J., y Poi, A. S. 2003. Connectivity processes as a basis for the management of aquatic plants.
- Neiff, J., y Neiff, M. 2004. Pulso. Software diseñado para estudiar fenómenos recurrentes en el tiempo. doi:<http://www.neiff.com.ar>.
- Neiff, J.J., S.L. Casco, A.S.G. Poi y V.A. Zambiasio. 2020. Influence of Yacyretá dam on trees distribution in the Paraná floodplain. *Ecological Engineering* 154 C. 105931.
- Paolini, L., J. A. Sobrino, y J. C. Jiménez Muñoz. 2002. Detección de deslizamientos de ladera mediante imágenes Landsat TM: el impacto de estos disturbios sobre los bosques subtropicales del noroeste de Argentina. *Revista de Teledetección*, 18, 21-27.
- Pero, E., y P. Quiroga. 2019. Riparian and adjacent forests differ both in the humid mountainous ecoregion and the semiarid lowland. *Plant Ecology*, 220(4), 481-498. doi: <https://doi.org/10.1007/s11258-019-00929-w>
- Pero, E. J., et al. 2020. Evaluación del déficit de bosques de ribera en Tucumán. *Ecología Austral*, 30, 484-496. doi:<https://doi.org/10.25260/EA.20.30.3.0.1117>
- Pokrovsky, O. S. 2016. Riparian zones: characteristics, management practices and ecological impacts. *Nova Science Publishers*, 383.
- Posthumus, H., J. R. Rouquette, J. Morris, D.J. Gowing y T.M. Hess. 2010. A framework for the assessment of ecosystem goods and services; a case study on lowland floodplains in England. *Ecological Economics*, 69, 1510-1523. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.02.011>
- Pouilly, M., S. Beek, R. Morales y C. Ibaéz. 2004. Diversidad biológica en la llanura de inundación del Río Mamoré. Importancia ecológica de la dinámica fluvial (Vol. Parte I_ Capítulo IV). Patiño, Santa Cruz, Bolivia : Centro de Ecología Simón.
- Pyszczyk, O. 2016. "Condiciones atmosféricas y clasificación climática del espacio geográfico correntino". En Contreras FI. y Odrizola, MP. Libro de la Junta de Geografía 2016. Pp. 6 - 17.

- Richards, J. 1999. Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer Verlag, Berlin, 3, 10-38.
- Riis, T., et al. 2020. Global Overview of ecosystem services provided by riparian vegetation. *BioScience*, 70(6), 501-514. doi: <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa041>
- Salvia, M., H. Karszenbaum, P. Kandus y F. Grings. 2009. Datos satelitales ópticos y de radar para el mapeo de ambientes en macrosistemas de humedal. *Revista de Teledetección*, 31, 35-51.
- Salvia, M. M. 2010. Aporte de la teledetección al estudio del funcionamiento del macrosistema Delta del Paraná: análisis de series de tiempo y eventos extremos. Buenos Aires: Biblioteca Digital-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales- Universidad de Buenos Aires, Tesis Doctoral .
- Schnack, J.A., et al. 1995. Estudios ambientales regionales para el proyecto de control de inundaciones. Buenos Aires: Ministerio del Interior. Sub Unidad Central de Coordinación para la emergencia.
- Sevillano Rodríguez, M. E. "Zonificación de la amenaza ante inundaciones a partir de un método de evaluación multicriterio en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia." *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica* 25 (2020): 47-76.
- Sisti, J. M. 2015. Mapeo de Costas en ambientes extremos, caso Isla Marambio, Antártida Argentina. La Plata: Facultad de Tecnología y Ciencias Aplicadas - Universidad Nacional de Catamarca, Tesis Doctoral.
- Smichowski, H. y F.I. Contreras. 2023. Análisis morfométrico de la cuenca río Santa Lucía (Corrientes, Argentina). *Revista Geográfica de América Central*: 70: 297-320 p
- Tabacchi, E., et al. 1998. Development, maintenance and role of riparian vegetation in the river landscape. *Freshwater Biology*, 40, 497-516.
- Yuan, F., K. E. Sawaya, B. C. Loeffelholz y M. E. Bauer. 2005. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota)

Metropolitan Area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98(2-3), 317-328. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.006>.