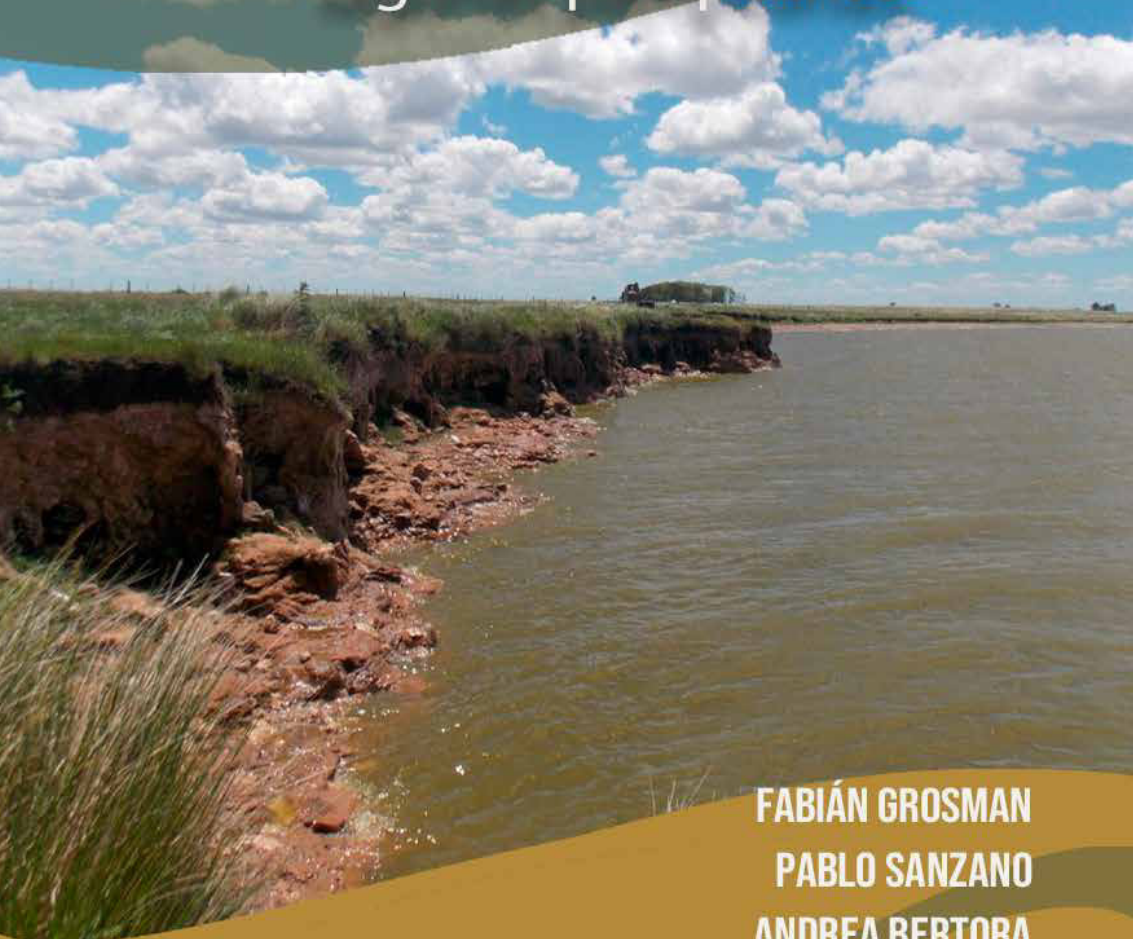


Destino



La Barrancosa.

Una invitación a conocer
lagunas pampeanas.



**FABIÁN GROSMAN
PABLO SANZANO
ANDREA BERTORA**

2019

EDITORES

Destino:

La Barrancosa.

**Una invitación a conocer
lagunas pampeanas.**

Grosman, Fabián

Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer lagunas pampeanas / Fabián Grosman ; Pablo Sanzano ; Andrea Bertora; compilado por Fabián Grosman; Pablo Sanzano; Andrea Bertora. - 1a ed. - Tandil: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 2019.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-658-495-5

1. Laguna. 2. Desarrollo Rural de la Región Pampeana. I. Grosman, Fabián, comp. II. Sanzano, Pablo, comp. III. Bertora, Andrea , comp. IV. Título. CDD 918.213

Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer lagunas pampeanas

Fabian Grosman, Pablo Sanzano y Andrea Bertora, (editores).

Diseño

Maribel Macchione

Fotografías de carátulas

Imágenes de lagunas pampeanas de Paula Mariluis, Florencia Castets y editores

Primera edición

noviembre de 2019

ISBN 978-950-658-495-5

Como citar: Grosman, F., P. Sanzano y A. Bertora (eds.). 2019.

Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer lagunas pampeanas.

Participantes

ALFONSO, MARÍA BELÉN.

BAIGÚN, CLAUDIO

BERASAIN, GUSTAVO EMILIO.

BERTORA, ANDREA.

BUSTINGORRY, JOSÉ.

CANZIANI, GRACIELA ANA.

CASTETS, FLORENCIA.

COLASURDO, VIVIANA.

COLAUTTI, DARÍO.

CORTELEZZI, AGUSTINA.

DEL FRESNO, PAMELA.

DEL PONTI, OMAR.

DIOVISALVI, NADIA.

ENTRAIGAS, ILDA.

ESCARAY, ROBERTO.

FERRATI, ROSANA.

FONTANARROSA, M. SOLEDAD.

FUSÉ, VICTORIA SUSANA.

GARCÍA DE SOUZA, JAVIER R.

GEREA, MARINA.

GIANSAnti SPLENDIANI, LORENA.

GLOK GALLI, MELISA.

GÓMEZ ROMERO, FACUNDO.

GROSMAN, FABIÁN.

GUZMÁN, SERGIO ALEJANDRO.

HERRERA, VICTORIA.

IZAGUIRRE, IRINA.

JULIARENA, MARÍA PAULA.

LAGOMARSINO, LEONARDO.

MAESTRI, MARÍA LAURA.

MANCINI, MIGUEL.

MARILUIS, PAULA.

MERLOS, CRISTINA SOLEDAD.

MESSINEO, PABLO.

MIR, FERNANDO CARLOS.

MIRANDA, LEANDRO.

PADÍN, DAMIÁN ALBERTO.

PERILLO, GERARDO M. E.

PICCOLO, MARÍA CINTIA.

PRIANO, MARÍA EUGENIA.

QUIROGA, MARÍA VICTORIA.

REQUESENS, EDUARDO.

ROJAS MOLINA, FLORENCIA.

ROSSO, JUAN JOSÉ.

SALINAS, VÍCTOR.

SÁNCHEZ, MARÍA LAURA.

SANZANO, PABLO.

UNREIN, FERNANDO.

VELASCO, CLAUDIA ALEJANDRA.

VITALE, ALEJANDRO.





ÍNDICE

CAPÍTULO

1

El Ángel de La Barrancosa 15
ILDA ENTRAIGAS

2

Las poblaciones indígenas prehispánicas en las lagunas pampeanas. El caso de “La Barrancosa” 18
PABLO G. MESSINEO

3

A la vera de la laguna Barrancosa había un fortín... Investigaciones arqueológicas en Fortín Otamendi (1858- 1869). 32
FACUNDO GÓMEZ ROMERO

4

La vida de una laguna: un ensayo sobre la sucesión ecológica. 48
JUAN JOSÉ ROSSO

5

Lagunas y agroecología. El valor de los cuerpos de agua como factor de agrobiodiversificación regional. 67
CRISTINA S. MERLOS Y EDUARDO REQUESENS

6

Uso de Imágenes Satelitales para el Estudio de las Lagunas Pampeanas. El Caso de La Barrancosa. 77
GRACIELA CANZIANI, FLORENCIA CASTETS, MARÍA L. MAESTRI Y ROSANA FERRATI

7

Utilidad del monitoreo lagunar ambiental con boyas multiparamétricas en la región pampeana: Laguna La Barrancosa 100
MARÍA B. ALFONSO, ALEJANDRO J. VITALE, GERARDO M. E. PERILLO Y MARÍA C. PICCOLO

8

El “ADN” de la laguna La Barrancosa: su origen y características hidrogeoquímicas e isotópicas 114
MELISA GLOK GALLI Y VIVIANA COLASURDO

9

¿Qué son “los nutrientes” en los ecosistemas acuáticos? 126
LEONARDO LAGOMARSINO, JOSÉ BUSTINGORRY Y ROBERTO ESCARAY

10

Contribución natural de la Laguna La Barrancosa a los Gases de Efecto Invernadero: aspectos metodológicos y estudio de las emisiones de metano. 131
VICTORIA S. FUSÉ, M. EUGENIA PRIANO, M. PAULA JULIARENA Y SERGIO A. GUZMÁN

11

Los organismos más diminutos de Laguna La Barrancosa: El picoplancton 144
MARINA GEREÁ, MARÍA V. QUIROGA Y FERNANDO UNREIN

12

Estructura del Fitoplancton de la laguna La Barrancosa 151
IRINA IZAGUIRRE Y MARÍA L. SÁNCHEZ

13

**Animales abundantes y diminutos en la laguna:
el zooplancton.** 164
M. SOLEDAD FONTANARROSA, FLORENCIA ROJAS MOLINA, M. BELÉN ALFONSO,
JAVIER R. GARCÍA DE SOUZA Y NADIA R. DIOVISALVI

14

**Invertebrados acuáticos del fondo
de la laguna La Barrancosa** 174
AGUSTINA CORTELEZZI

15

Los peces de las lagunas de la ecorregión Pampeana 180
DARÍO COLAUTTI, JAVIER GARCÍA DE SOUZA Y CLAUDIO BAIGÚN

16

**Ni Nemo ni Dory, con ustedes: Los peces de la laguna
La Barrancosa** 199
ANDREA BERTORA, PABLO SANZANO Y FABIÁN GROSMAN

17

**Influencia de la temperatura del agua sobre la época de
desove del pejerrey** 212
LEANDRO A. MIRANDA Y PAMELA S. DEL FRESNO

18

**Experiencias de cultivo de pejerrey (*Odontesthes bonariensis*)
en la Estación Hidrobiológica Chascomús** 224
CLAUDIA A. VELASCO, GUSTAVO E. BERASAIN, DAMIÁN A. PADÍN Y FERNANDO C. MIR

19

**La pesca recreativa-deportiva del pejerrey: una actividad
masiva y dinamizadora** 237
FABIÁN GROSMAN, MIGUEL MANCINI, OMAR DEL PONTI,
PABLO SANZANO Y VÍCTOR SALINAS

20

**Contexto, laguna y territorio. La pesca deportiva en
La Barrancosa.** 255
CRISTINA S. MERLOS Y FABIÁN GROSMAN

21

Aves más notorias de laguna La Barrancosa 265
LORENA GIANSANTI SPLENDIANI Y VICTORIA HERRERA

**Proyecto Argentino de Monitoreo
y Prospección de Ambientes Acuáticos
(PAMPAA)** 284



CAPÍTULO 6



Uso de imágenes satelitales para el estudio de las lagunas pampeanas. El caso de La Barrancosa.

Graciela Canziani, Florencia Castets, María L. Maestri y Rosana Ferrati

Introducción

Las lagunas pampeanas se caracterizan por su elevada numerosidad (solamente en la provincia de Buenos Aires se han contabilizado más de cien mil de distinta extensión), por ser ambientes polimícticos, poco profundos, con variaciones frecuentes de su nivel hidrométrico y de su superficie en función de precipitaciones regionales y del balance subterráneo, con sedimentos propios, situados en un ambiente de grandes llanuras, suelos con elevado contenido de materia orgánica donde se practican diferentes actividades agropecuarias (Ringuelet, 1962; Dangavs, 2005).

La observación de las lagunas evidencia una dinámica cambiante (estacional y anualmente) sin un patrón claro en diversos aspectos: profundidad, superficie libre, turbidez, concentración de nutrientes, de clorofila (Cl-a), de sólidos en suspensión, conductividad, etc. Incluso, dos lagunas con similares condiciones ambientales pueden exhibir distinta composición biológica incluyendo sus peces en cantidad y especies. Trabajos preliminares señalan una relación inversa entre el volumen de agua retenido y los valores de indicadores de estado trófico, vinculando precipitaciones, que cambian las concentraciones, y vientos, que producen la resuspensión de partículas, con el grado de eutrofia de las lagunas pampeanas. Así las lagunas pampeanas no sólo están condicionadas por las actividades que se desarrollan en su entorno, y son reveladoras del buen o mal manejo del territorio, sino que también responden a forzantes climáticos cuyo efecto dinámico aún no se ha estudiado lo suficiente.

Estudios paleoclimáticos de lagunas bonaerenses indican la presencia de ciclos secos y húmedos que afectan su dinámica, así como de significativa variabilidad interdecádica, es decir entre datos de una década a otra. Por ejemplo, los estudios climáticos de la Argentina demuestran la presencia en una parte de la región pampeana, de variabilidad interanual y también decádica a interdecádica asociada al fenómeno El Niño. La dificultad en la comprensión de la complejidad de las interrelaciones entre procesos biológicos y geofísicos (suelos, agua y atmósfera) se debería a que los procesos no son lineales y se presentan retardos que aún no están claramente identificados ni cuantificados. A esto se sumaría la falta de conocimiento sobre posibles retroalimentaciones entre dichos procesos. La comprensión de la dinámica de la interacción entre el clima y ecosistemas acuáticos lénticos como son las lagunas de la región pampeana es fundamental para poder conservarlos, utilizando sus recursos y garantizando los servicios ecológicos brindados.

Dada la mencionada numerosidad de lagunas, una forma ventajosa de estudiarlas y entender su función en el ecosistema pampeano es a través del uso de imágenes de sensores remotos o satelitales. No solamente son útiles para casos de ambientes de difícil acceso, sino también porque a través de una secuencia temporal es posible analizar la dinámica de un conjunto de lagunas insertas en una cuenca o bien vincularlas al paisaje circundante. Un primer paso para comenzar a comprender esta interacción es la determinación de las variaciones que muestra el volumen de agua de

cada laguna pampeana, medido en este trabajo por su superficie de agua libre (Figura 1). Nos interesa vincular la variación del volumen de agua de una o más lagunas con las precipitaciones sobre una región, dado que está vinculada con las concentraciones de nutrientes y plancton variables que condicionan la red trófica del ecosistema.

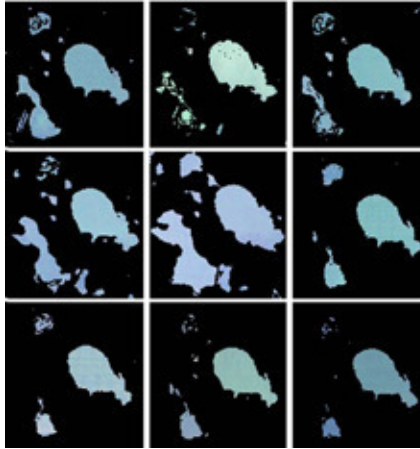


FIGURA 1. VARIACIÓN DE ÁREAS DE CUERPOS DE AGUA (LA BARRANCOSA Y SU ENTORNO) OBTENIDAS DE IMÁGENES LANDSAT CAPTURADAS ENTRE MAYO DE 2000 Y OCTUBRE DE 2005.

El objetivo es generar un método que sirva no sólo para estudiar una laguna sino que pueda generalizarse a otras e incluso aplicarse a una cuenca o región. Eso permitiría indagar, en una escala espacial y temporal mayor, el vínculo entre la dinámica que muestran las lagunas pampeanas y las precipitaciones. Contando con modelos de simulación de clima que generan series de datos siguiendo los escenarios de cambio climático del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por su sigla en inglés), sería posible proyectar dinámicas a futuro y prever formas de gestión (Flato et al., 2013). La variabilidad en el tamaño de las lagunas y su dinámica trófica depende del balance hídrico de la cuenca, incluyendo las variables de evaporación, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración. El estudio que presentamos en este capítulo analiza la relación entre el régimen de precipitaciones y el área superficial de las lagunas pampeanas tomando como caso a La Barrancosa y su entorno, lo cual es un nuevo paso para conocerlas mejor y gestionarlas más eficientemente.

La hipótesis de trabajo es que existe una relación entre el área superficial y las precipitaciones regionales y que el efecto de las mismas tanto en el incremento como en la disminución no es necesariamente inmediato. Si bien hemos dejado de lado los efectos de la temperatura, que incide sobre la evaporación y la evapotranspiración afectando el balance hídrico superficial y subterráneo, consideramos indirectamente el escurrimiento superficial y el aporte subterráneo del acuífero a través del retardo de la respuesta que muestra la laguna, medida en términos de su área.

En una primera etapa se construyeron las bases de datos de las precipitaciones, tomando datos diarios de las estaciones meteorológicas cercanas a los cuerpos de

agua, y del área de cada laguna bajo estudio a lo largo del tiempo, a través de un adecuado procesamiento de imágenes de la misión Landsat.

Si bien el modelo estadístico se desarrolló para la laguna La Barrancosa (Figuras 2 y 3), quisimos verificar que la metodología es la adecuada aplicándola a otras dos lagunas cercanas, El Chifle y La Salada. Estas 3 fueron parte de los ambientes seleccionados por el proyecto PAMPAA. Se sumaron dos lagunas ubicadas cerca de la ciudad de Tres Arroyos, que integran una cuenca totalmente diferente: La Tigra y Tres Lagunas. Estos cinco ambientes comparten características de interés que justifican su elección.



FIGURA 2. LAGUNA LA BARRANCOSA. FOTO: FLORENCIA CASTETS.



FIGURA 3. LAGUNA LA BARRANCOSA. FOTO: FLORENCIA CASTETS.

¿Qué son las imágenes satelitales?

La teledetección o sensoramiento remoto es una técnica que permite adquirir información mediante el análisis de datos colectados por instrumentos que no están en contacto físico con los objetos investigados. Aquí nos interesan los sensores remotos, instalados en satélites que orbitan la Tierra para medir la energía o radiación electromagnética (REM) que es reflejada o emitida por los objetos que se encuentran en la superficie terrestre. La REM es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan en forma de ondas a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. A diferencia de otros tipos de onda (como el sonido), que necesitan un medio material para propagarse, la REM se puede propagar en el vacío. El sensor remoto detecta esta REM y la convierte en valores digitales para formar una imagen (Figura 4).

El conjunto de todas las ondas electromagnéticas se denomina espectro electromagnético. El espectro electromagnético incluye desde las ondas de radio (de menor frecuencia, se utilizan para propagar señales de radio y televisión) hasta los rayos gamma (de mayor frecuencia, son de origen nuclear); entre ellas se ubican las microondas (de baja frecuencia, se utilizan en radares y otros sistemas de comunicaciones), los rayos infrarrojos (emitidos por cuerpos calientes), la luz o espectro visible (conformado por las longitudes de onda para la cual la retina humana es sensible, y en la que cada longitud de onda produce un color), los rayos ultravioleta (energía involucrada en muchas reacciones químicas), y los rayos X (de aplicación médica) (Figura 5).

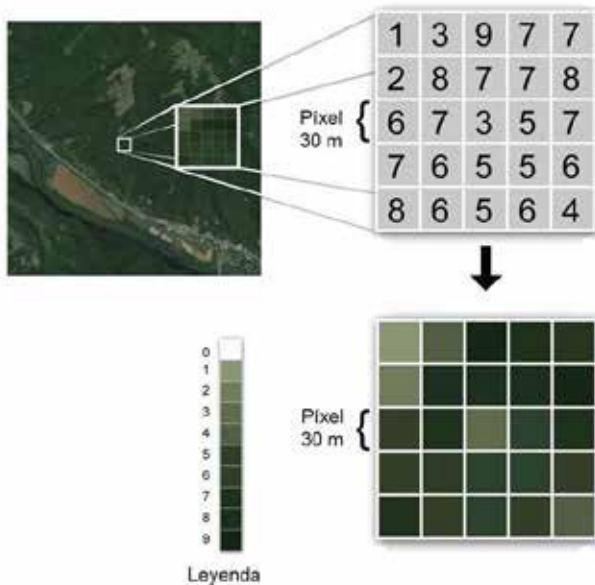


FIGURA 4. CADA PÍXEL ESTÁ ASOCIADO A UN NÚMERO QUE MIDE LA RADIANCIA PROMEDIO O BRILLO CORRESPONDIENTE AL ÁREA SUPERFICIAL ABARCADA POR ESE PÍXEL Y LA TRADUCE A TONOS DE GRIS. CUANDO SE COMBINAN DICHAS BANDAS SE PUEDEN OBTENER IMÁGENES EN COLOR. FIGURA ADAPTADA DE [HTTPS://GEOHACKWEEK.GITHUB.IO/RASTER/02-RASTERCONCEPTS/](https://GEOHACKWEEK.GITHUB.IO/RASTER/02-RASTERCONCEPTS/)

La radiación electromagnética se describe usualmente en función de longitudes de onda. En teledetección se usan las ondas de las siguientes longitudes:

- Espectro visible (0,4 a 0,7 μm), que es la radiación que pueden percibir nuestros ojos.
- Infrarrojo cercano IRC (0,7 a 1,3 μm), que resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio IRM (1,3 a 8 μm), en la que se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- Infrarrojo térmico IRT (8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva de calor del espectro terrestre.
- Microondas (a partir de 1 mm), que presentan un gran interés por ser un tipo de energía que atraviesa la cubierta nubosa.

Al incidir sobre un cuerpo, la REM puede ser reflejada o absorbida, o bien ser transmitida a través de él. Un objeto también puede emitir REM. Cada longitud de onda muestra un comportamiento diferente según el objeto con el que interactúa, y por eso los objetos tienen diferentes colores. Cuando vemos un objeto de un color dado es porque refleja la radiación en esa longitud de onda específica y absorbe todas las demás.

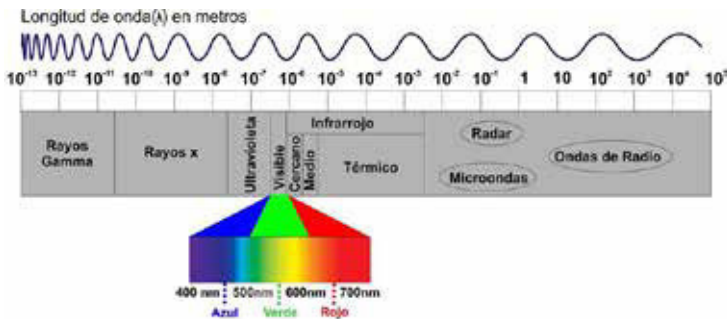


FIGURA 5. REPRESENTACIÓN DE LAS DISTINTAS LONGITUDES DE ONDA DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO.

El sol emite la radiación que incide, en primer lugar, en la atmósfera. Una vez que la radiación solar traspasa la atmósfera y llega a la superficie terrestre, encuentra todo tipo de materiales diferentes: aguas dulces y saladas, suelo desnudo de distintos tipos, nieve, zonas de vegetación densa, zonas de vegetación arbustiva, pastizales, ciudades, etc. Cada tipo de superficie interactúa con la radiación de manera diferente, absorbiendo unas longitudes de onda muy concretas y reflejando otras diferentes en unas proporciones determinadas. No será igual la radiación que refleja un suelo con césped que un playón de cemento pintado de verde, aunque lo veamos del mismo color. Esto permite que se puedan identificar los distintos objetos: suelo, vegetación (incluso distinguiendo tipos de especies), aguas, entre otros, ya que mediante experimentos en superficie se ha podido caracterizar el comportamiento de estas distintas superficies al recibir radiación y se han cuantificado los porcentajes de reflexión, absorción y transmisión en cada caso (Figura 6).

La reflectancia se refiere a la relación entre la energía electromagnética incidente con respecto a la energía reflejada en una interfase. El espectro de reflectancia o curva de reflectancia espectral es el gráfico de la reflectividad en función de la longi-

tud de onda, es decir en qué proporción las ondas de cada longitud contribuyen en la señal (Figura 6). Dicha curva se denomina firma espectral y caracteriza la superficie analizada. Sin embargo, la firma espectral de un objeto no es necesariamente siempre la misma sino que puede variar, por ejemplo en la vegetación, según condiciones estacionales, de humedad o de crecimiento. Las lagunas pampeanas presentan firmas espectrales diferentes, en función del estado trófico de las mismas. Un ejemplo de firmas espectrales obtenidas con los valores de reflectancia de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de imágenes Landsat 7 durante el período 1984-2015 se presenta en la Figura 7 para la laguna La Barrancosa.

Los satélites están equipados con un sensor multispectral que captura imágenes tanto del espectro visible como del no visible, proporcionando una imagen en cada una de las bandas para las que ha sido equipado. Es decir que el sensor del satélite detecta la radiación de la cubierta terrestre (vegetación, suelos, agua, construcciones, etc.), sea reflejada o emitida, y forma una imagen con varias bandas (multiespectral), una por cada intervalo de longitudes de onda que él captura (Figura 8). Por ejemplo, el satélite Landsat 7 (ETM+) registra la información de la reflectancia en las bandas de 1 a 7, en las longitudes de onda que muestra la Figura 9. El número de bandas que la imagen de un satélite puede tener depende del tipo de satélite. El satélite graba la imagen que luego envía a una estación terrestre que dispone de un sistema de recepción para su corrección y posterior distribución al usuario final.

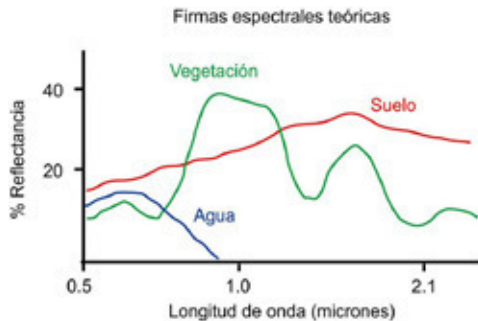


FIGURA 6. A PARTIR DE MEDICIONES SE OBTIENEN FIRMAS ESPECTRALES PARA DISTINTAS CUBIERTAS TERRESTRES.

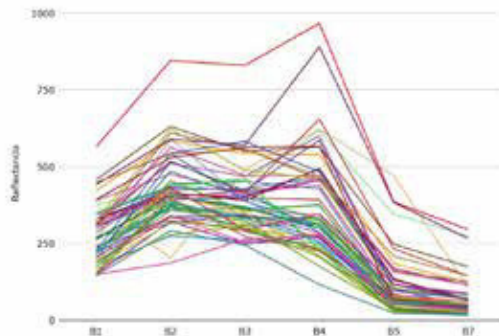


FIGURA 7. FIRMAS ESPECTRALES DE LA BARRANCOSA OBTENIDAS DE IMÁGENES LANDSAT EN DISTINTAS FECHAS DE LA SERIE 1984-2015.

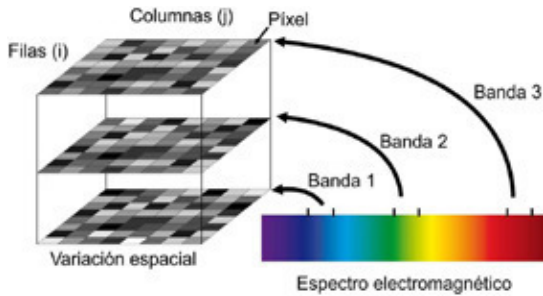


FIGURA 8. CADA BANDA DEL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO QUE DETECTA EL SENSOR DEL SATELITE GENERA UNA CAPA DE LA IMAGEN.

En el caso de un cuerpo de agua, los píxeles que toman información de la reflectancia de su superficie no son todos de idéntico valor. Para tener la firma espectral del cuerpo de agua se selecciona un número crítico de píxeles al interior de su superficie y se toman los valores promedio en cada una de las bandas. Se debe tomar en cuenta que la variación que muestran las reflectancias en cada una de las bandas en distintas fechas indica distintos estados tróficos de la laguna.

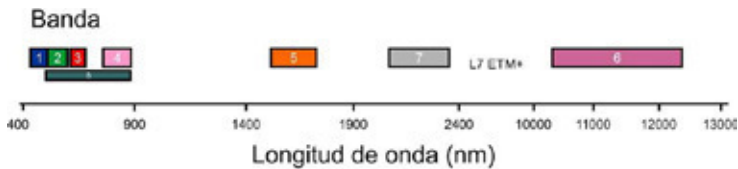


FIGURA 9. REPRESENTACIÓN DE LAS BANDAS QUE DETECTA EL SATELITE LANDSAT 7 ETM+.

¿Todos los satélites de teledetección son iguales?

Los satélites de teledetección tienen diferentes características en función del objetivo de su construcción y puesta en órbita. Los satélites de teledetección se caracterizan según resoluciones de distinto tipo:

- **Resolución espacial:** es una medida de la distancia más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie de la Tierra, y viene determinada por el tamaño que representa un píxel en la superficie terrestre.
- **Resolución radiométrica:** indica la capacidad del sensor de distinguir niveles o intensidades de radiancia.
- **Resolución espectral:** indica el número y ancho de bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Se denomina sensor hiperespectral a aquel que mide la energía simultáneamente en muchas bandas espectrales, normalmente más de cien.
- **Resolución temporal:** indica el tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto, lo cual determina la periodicidad de adquisición de imágenes de una misma zona.

Para realizar este trabajo, es decir para estudiar la dinámica de la superficie libre de un cuerpo de agua léntico como es una laguna, se utilizó una serie de imágenes Landsat (Landsat 4 TM, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+). La resolución espacial es de 30 x 30 m² mientras que la resolución radiométrica es de 8 bits, es decir, la escala de grises se extiende de 0 a 255, totalizando 256 valores. Los satélites Landsat cuentan con una resolución espectral de 7 bandas que abarcan el espectro visible (bandas 1, 2 y 3), el infrarrojo (banda 4 IRC, banda 5 y 7 IRM, banda 6 IRT). Además el satélite Landsat 7 cuenta con una banda pancromática. La periodicidad es de 16 días; con ese lapso es que pasa exactamente por el mismo lugar aunque realice varias vueltas a la Tierra cada día.

¿Para qué y cómo se pueden usar las imágenes satelitales?

Las imágenes satelitales son una herramienta excepcional para la interpretación y evaluación de variables ambientales en una región. La teledetección espacial ofrece ventajas en comparación con otras técnicas de observación de la superficie. Los sensores remotos están ubicados en plataformas que se encuentran en el espacio exterior, por lo que pueden obtener información de regiones de difícil acceso y cubrir la totalidad de la superficie. Además, permite el estudio de sistemas ambientales dinámicos ya que sus datos se actualizan con una frecuencia temporal muy alta y al ser digitales permiten analizar cantidades de datos simultáneamente de forma computacional.

El usuario final de la imagen satelital debe interpretarla, o sea, convertirla en categorías que ayuden a conocer mejor el territorio, y para eso debe hacer una clasificación digital, identificando cada cubierta terrestre asignándole una categoría.

Los métodos de clasificación digital se han dividido en dos grupos de acuerdo a cómo son entrenados para procesar la imagen: supervisados y no supervisados. El primero implica un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías. En cambio, el método no supervisado realiza una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen; supone, en primer lugar, identificar sobre la imagen zonas homogéneas en cuanto a tonos, textura, disposición, etc. para luego asignarlas a una de las clases establecidas. Estas clases o grupos equivalen a conjuntos de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo. Otra forma de discriminar categorías en una imagen satelital es haciendo uso de índices espectrales. Se trata de transformaciones de la imagen realizando operaciones entre bandas originales con el fin de crear imágenes artificiales que revelen las características deseadas.

Como mencionamos al inicio de este capítulo, el objetivo del trabajo es poder vincular la variación del área de las lagunas pampeanas a las precipitaciones registradas sobre una región en torno a ellas. Por lo tanto el primer paso requiere identificar un método computacional que permita calcular con la mayor precisión posible el área que cada cuerpo de agua ocupa a partir de la información que ofrece la imagen satelital. Es decir, un método para “discriminar” en la imagen el agua de otro tipo de superficies (suelo desnudo, vegetación, piedra, etc.).

Distintos métodos para determinar la superficie libre de las lagunas

Se usaron diferentes métodos de clasificación para determinar el área de la super-

ficie libre de cada laguna a partir de las imágenes Landsat con el objeto de comparar los resultados obtenidos e identificar el método más preciso y conveniente para analizar su dinámica. Se seleccionaron dos imágenes por año, una de la estación verano y otra de invierno (path-row 225-86 y 226-86) correspondientes al período 1984 - 2004. Las mismas fueron adquiridas a través del sitio web Global Visualization Viewer (GloVis) (<https://glovis.usgs.gov/>) perteneciente al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Todas las imágenes utilizadas son productos tipo 1 Higher-Level corregidas geométrica y atmosféricamente.

Para el cálculo de la superficie libre de las lagunas se utilizaron tres métodos de clasificación (K-means, ISODATA y Máxima Verosimilitud) y dos índices (NDWI y MNDWI) (Richards, 1999). El procesamiento con cada uno de estos métodos se realizó haciendo uso del programa ENVI (Environment for Visualizing Images), un software especializado para el análisis y procesamiento de imágenes satelitales.

Para los clasificadores no supervisados K-means e ISODATA, el software permite definir parámetros como la cantidad de iteraciones, número de clases, etc. Esta definición va a depender del caso a tratar. Por ejemplo, en la elección del número de clases se recomienda comenzar probando con un número elevado de clases, y luego interpretar la imagen resultante. Una vez realizada la interpretación, se puede ajustar el número de clases reduciéndolo y volver a procesar. En el caso de la cantidad de interacciones, también se ajusta en función de la interpretación de los resultados que se obtienen. Para el clasificador de Máxima Verosimilitud, un algoritmo de clasificación supervisado, se realizó la selección de muestras para entrenamiento a partir de píxeles contenidos en la región de interés con el propósito de condicionar el aprendizaje del algoritmo.

Por otro lado, se utilizaron los Índices de Diferencia Normalizada de Agua (NDWI, Normalized Difference Water Index) propuesto por McFeeters (1996) e Índice de Diferencia Normalizada de Agua Modificado (MNDWI, Modified Normalized Difference Water Index) propuesto por Xu (2006). Los índices NDWI y MNDWI se estiman a partir de las siguientes expresiones respectivamente:

$$NDWI = \frac{\text{Verde} - \text{IRC}}{\text{Verde} + \text{IRC}}$$

$$MNDWI = \frac{\text{Verde} - \text{IRM}}{\text{Verde} + \text{IRM}}$$

donde verde representa el valor de la reflectancia en la banda correspondiente a la longitud de onda que refleja en color verde, IRC el valor de la reflectancia en la longitud de onda infrarrojo cercano e IRM en el infrarrojo medio. La relación entre bandas permite maximizar la reflectancia del agua al trabajar con longitudes de ondas en el verde, maximiza la reflectancia de la vegetación y minimiza la reflectancia de masas de agua gracias a la banda del infrarrojo cercano (IRC) y del infrarrojo medio (IRM). De esta manera, la presencia de agua queda resaltada en la imagen que se obtiene. Los resultados obtenidos en la separación de superficie de agua respecto del suelo a partir de algoritmos de clasificación supervisados (Máxima Verosimilitud), no supervisados (ISODATA y K-means) e índices espectrales (NDWI y MNDWI), permitieron evaluar la capacidad de los mismos para seguir la dinámica del área de la laguna La Barrancosa para el período 1984 - 2004 posibilitando así evaluar su precisión y costo computacional.

No hay un método directo a campo para calcular el área de la superficie libre de un cuerpo de agua sino que, en todos los casos, se obtiene una estimación indirecta, sea

a través de una imagen satelital, sea a través de una aplicación de GPS que también depende de uno o varios satélites. Debido a esto, tomamos el valor promedio de los resultados de los cinco métodos para cada una de las fechas i , como estimación de referencia o verdad de campo, que denominamos valor de referencia $vr(i)$.

Para cada método, se tomó para cada fecha i la diferencia o error absoluto (EA) entre el área obtenida aplicando ese método (estimada) y el área de referencia $vr(i)$.

$$EA(i) = \text{area}(i) - vr(i)$$

Estas diferencias permiten calcular la magnitud del error relativo (ER) respecto del valor de referencia $vr(i)$ a partir de la siguiente expresión:

$$ER(i) = \frac{|\text{area}(i) - vr(i)|}{vr(i)}$$

El máximo error relativo alcanzado permite obtener un indicador de la precisión del método. El inconveniente de este indicador es que, como sólo se obtiene en referencia a una evaluación puntual, no permite apreciar cuán buenos o malos fueron los resultados obtenidos para el conjunto de las observaciones. Para tener una medida global (error global EG) de la bondad de un método dado para toda la serie de imágenes utilizadas, calculamos el promedio de estas distancias relativas ER obtenidas con este método sobre dicha serie. En otros términos, se calculó cuánto se apartan en promedio las áreas calculadas con este método del valor de referencia a lo largo de las N fechas consideradas:

$$EG = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ER(i)$$

También fue considerado el error euclídeo (EE) de los valores obtenidos con cada método respecto del promedio, dado que representa la acumulación de los errores a lo largo de N fechas consideradas:

$$EE = \left[\sum_{i=1}^N (\text{area}(i) - vr(i))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

donde, $\text{area}(i)$ es el área calculada para la fecha i por el método en cuestión y $vr(i)$ es el valor de referencia para la misma fecha i .

Los resultados obtenidos se volcaron en la Tabla 1, y permiten comparar la eficiencia de los métodos. Las dos primeras filas indican cuales son las fechas i para las que el área calculada se aparta más del valor de referencia $vr(i)$ mientras que las dos últimas nos muestran dos formas diferentes de calcular los errores globales, es decir, los errores respecto del conjunto de datos. Estas dos últimas filas ponen en relieve la bondad del MNDWI entre los índices y de K-means entre los métodos de clasificación, mientras que NDWI, ISODATA y Máxima Verosimilitud presentan a su vez los mayores valores globales de error. En otras palabras, los dos primeros indicadores de precisión buscan la mayor diferencia encontrada entre el valor calculado con un método dado y el valor de referencia $vr(i)$ y permite saber qué día ocurrió ese mayor error. En el caso del valor absoluto EA(i), se obtiene esa diferencia en términos de hectáreas. Pero la importancia de ese error varía según la laguna sea grande o chica. No es lo mismo una diferencia de 2 ha en una laguna de 7 ha que en una de 145 ha. Por eso, suele ser mejor indicador el error relativo ER(i) en términos de porcentaje. Con los dos últimos indicadores, se quiere saber cuán ajustado es el método usado para calcular el área tomando las diferencias observadas respecto del valor de referencia $vr(i)$ en el conjunto de fechas.

Tabla 1. Errores del cálculo del área con cada método respecto del valor de referencia (vr).

Método	MNDWI	NDWI	ISODATA	K-means	Máxima Verosimilitud
max(EA) [ha]	23,40 (27/1/2000)*	35,33 (27/6/1997)	18,25 (28/1/1998)	20,02 (27/6/1997)	16,09 (30/6/2004)
max(ER) [%]	13,85 (27/1/2000)	25,68 (27/6/1997)	12,98 (27/6/1997)	14,55 (27/6/1997)	10,49 (27/6/1997)
EG [%]	2,35	3,38	3,20	2,70	3,15
EE [ha]	38,88	56,45	43,73	39,75	44,39

*Entre paréntesis figura la fecha en la que se observó ese error.

En la Figura 10 se muestra la evolución del área de la laguna La Barrancosa entre 1984 y 2004, calculada por cada uno de los métodos y también el área promedio que se tomó como valor de referencia vr. Se observa que los cinco métodos reflejan una dinámica similar en la evolución del área.

Sin embargo, aun cuando los resultados del cálculo del área de La Barrancosa siguen una dinámica similar, hay diferencias en la estimación del área en cada fecha. En la Figura 11 se grafican las diferencias entre el área calculada con cada uno de los métodos y el valor de referencia vr. Se puede observar que los valores obtenidos con el índice MNDWI se encuentran en promedio más cerca del valor de referencia.



FIGURA 10. EVOLUCIÓN DEL ÁREA DE LA LAGUNA LA BARRANCOSA ENTRE 1984 Y 2004, SEGÚN CADA UNO DE LOS MÉTODOS. EN NEGRO SE APRECIA EL VALOR DE REFERENCIA VR.

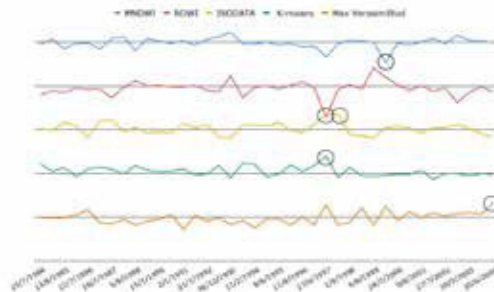

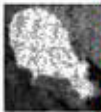


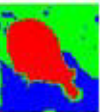
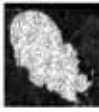
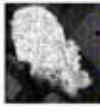
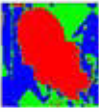

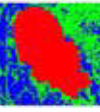


FIGURA 11. PARA CADA MÉTODO SE GRAFICA EL ERROR ABSOLUTO EA(i) EN EL CÁLCULO DEL ÁREA DE LA LAGUNA LA BARRANCOSA PARA EL PERÍODO 1984-2004. LOS CÍRCULOS SEÑALAN EL MÁXIMO ERROR OBSERVADO.

Identificación de áreas extremas para La Barrancosa

En ocasiones es importante saber hasta dónde puede crecer o hasta donde puede retroceder una laguna. A modo de ejemplo de la utilización de los distintos métodos analizados, en la Tabla 2 se puede ver el resultado del procesamiento con cada uno con el objeto de identificar el área máxima y el área mínima alcanzadas en el período 1984 - 2004. En ella se muestra el área máxima y el área mínima calculada y las imágenes correspondientes. Este tipo de información puede ser interesante para determinar probabilidades de riesgo en torno de las lagunas.

Tabla 2. Áreas [ha] extremas, mínima y máxima, e imagen correspondiente según los diferentes métodos.

	MNDWI	NDWI	ISODATA	K-means	Máxima Verosimilitud
Mínimo [ha]	120,60	102,24	146,34	149,67	146,52
					
Máximo [ha]	223,65	214,56	231,21	224,64	212,13
					

Cálculo del área a campo

Para realizar una corroboración a campo de estos resultados se procedió a recorrer a pie el perímetro de la laguna llevando un GPS (precisión en terreno de $\pm 3,6$ m) con una aplicación que permite el cálculo del área comprendida en un recorrido cerrado (Figuras 12 y 13). Ese resultado fue comparado con los obtenidos con cada uno de los cinco métodos en una imagen Landsat 8 registrada en fecha cercana a la recorrida. Los resultados obtenidos con el análisis comparativo de estos cinco métodos han sido satisfactorios en el sentido de que se pudo identificar al índice MNDWI como un método sencillo y rápido desde el punto de vista computacional que entrega resultados bastante acertados del área de la laguna La Barrancosa, dado que los errores globales calculados desde dos distintas perspectivas resultan relativamente pequeños (Tabla 3).

Tabla 3. Medición de área a partir de métodos y su diferencia con datos de terreno para la fecha 2/10/2018.

Método	Área [ha]	Diferencia [ha]	Error (%)
GPS	186,02	0	0
MNDWI	186,03	0,01	0,01
NDWI	179,91	6,11	3,28
ISODATA	179,37	6,65	3,57
K-means	178,29	7,73	4,15
Máxima Verosimilitud	165,06	20,96	11,27

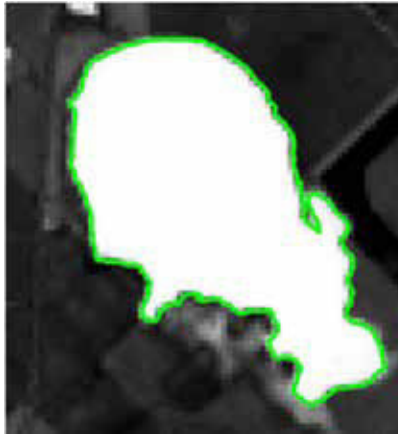


FIGURA 12. SUPERPOSICIÓN DEL RECORRIDO REGISTRADO POR EL GPS EN LA IMAGEN LANDSAT 8 OBTENIDA EN LA FECHA 2/10/2018 PROCESADA PARA RESALTAR LA SUPERFICIE DE AGUA LIBRE APLICANDO EL MNDWI.



FIGURA 13. RECORRIDO DEL BORDE DE LA LAGUNA LA BARRANCOSA CON GPS. FOTO: M. L. MAESTRI.

En función de los resultados obtenidos, se utilizará para el cálculo del área de las lagunas el índice MNDWI puesto que mostró el menor error en la identificación de píxeles con agua.

¿Cómo se puede relacionar la variación del área de la laguna con las precipitaciones?

Las lagunas pampeanas son, en su mayoría, endorreicas, es decir, no reciben aportes de cursos de agua superficial como arroyos o ríos. En estas lagunas, el mayor movimiento de agua se da en sentido vertical, los aportes se deben fundamentalmente a la precipitación y las pérdidas se dan esencialmente por evaporación. También hay una vinculación con el agua subterránea, pudiendo la laguna recibir agua o aportar agua al acuífero dependiendo de la época del año y/o de la geología subyacente. El agua precipitada durante una tormenta en cercanías de una laguna endorreica,

puede escurrir hacia ella o infiltrarse en el suelo que la circunda. Si se infiltra, parte del agua es evapotranspirada a través de la vegetación que cubre el suelo y otra parte alimenta el acuífero subterráneo.

El volumen de agua de una laguna y, en consecuencia, su superficie de agua libre, variará en función del agua superficial y/o subterránea que reciba y de la evaporación que se produce desde el cuerpo de agua. La respuesta al agua que recibe por escurrimiento es rápida, mientras que los aportes o pérdidas desde o hacia el acuífero son lentos y poseen una dinámica diferente.

El problema es que no se sabe cuánto tiempo puede tomarle a cada gota de agua precipitada el recorrido hacia la laguna, en el caso de que llegue a ella, razón por la cual es importante conocer las precipitaciones previas o antecedentes ocurridas en las cercanías de la misma para determinar si es relevante su aporte.

Para conocer la relación entre el área de la superficie libre de cada una de las lagunas estudiadas, las precipitaciones y las frecuencias de días de precipitación antecedentes a cada fecha de imagen utilizada, se realizó un análisis de regresión lineal múltiple (ver Anexo del presente capítulo) utilizando el área superficial de la laguna como variable respuesta (dependiente) y las variables de precipitación (mm precipitados y cantidad de días de precipitación) como variables explicativas (independientes). Cuando se hace un análisis de regresión lineal, se busca poder describir a una variable, en este caso el área, como una combinación lineal, o suma ponderada, de otras variables que, a priori, se comportan de manera aparentemente independiente pero que en la realidad la variable respuesta se vincula con ellas.

¿Es posible estimar la precipitación en algún lugar específico si en ese sitio no hay una estación de “registro”?

Se mencionó que hay más de cien mil lagunas en la provincia de Buenos Aires únicamente. Es claro que no se cuenta con una estación pluviométrica al lado de cada una de ellas. Entonces es necesario estimar la precipitación local en función de los registros de estaciones meteorológicas cercanas, que usualmente se encuentran en ciudades, aeropuertos o estaciones experimentales del INTA.

Existen distintos métodos para determinar la precipitación diaria en una laguna. Algunos se basan en el concepto de interpolación para estimarla, esto significa que a partir de un conjunto de valores (puntos) conocidos se obtienen nuevos por medio de ciertas operaciones matemáticas. Aquí utilizamos el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW, Inverse Distance Weighting), el cual presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a medida que crece la distancia desde el “punto” desconocido cuyo valor se desea crear. Así los puntos cercanos deben tener valores más parecidos que los lejanos.

Dado que se trabajó en la Llanura Pampeana, donde el relieve presenta escaso o nulo declive, se utilizó el método IDW lineal, puesto que es más adecuado para este tipo de región. A modo de ejemplo, en la Figura 14 tenemos representados 4 puntos rojos sobre una grilla con valores conocidos y el sitio que se desea estimar (en violeta) y se eligen los 3 más cercanos. Para cada uno se indica el valor que la variable que se desea interpolar toma en ese punto. También se indican las respectivas distancias al punto violeta donde se desea estimar el valor que toma dicha variable (desconocido).

Lo que hace el método es calcular el inverso del promedio pesado de las distancias y lo divide por el inverso del promedio de las distancias, de ahí su nombre:

$$\frac{\frac{12}{350} + \frac{10}{750} + \frac{10}{850}}{\frac{1}{350} + \frac{1}{750} + \frac{1}{850}} = 11,1$$

Así el valor interpolado para la variable en el punto violeta es de 11,1.

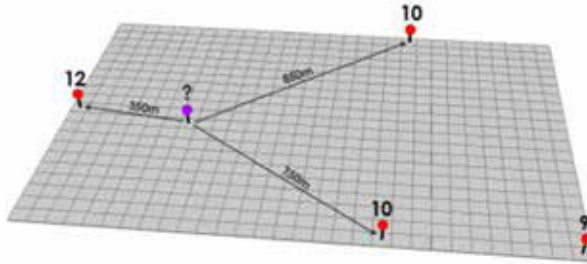


FIGURA 14. EJEMPLO DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DISTANCIA INVERSA PONDERADA. IMAGEN EXTRAÍDA DE [HTTPS://ACOLITA.COM/INTERPOLACION-CON-LA-DISTANCIA-INVERSA-PONDERADA-IDW/](https://acolita.com/interpolacion-con-la-distancia-inversa-ponderada-idw/)

En nuestro caso, para la laguna La Barrancosa se ponderaron los datos de precipitación diaria de las estaciones meteorológicas de Olavarría y de Benito Juárez del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Dado que la laguna se encuentra a 53 km de la ciudad de Olavarría y a 47 km de Benito Juárez, estimamos la precipitación en la laguna con la siguiente expresión:

$$\frac{\frac{Olav}{53} + \frac{BJ}{47}}{\frac{1}{53} + \frac{1}{47}} = 0,47Olav + 0,53BJ$$

donde Olav representa la precipitación en la ciudad de Olavarría y BJ la precipitación de Benito Juárez. Este método se puede utilizar con cualquier laguna y con cualquier número de estaciones meteorológicas cercanas para realizar la interpolación. Por otro lado, se analizaron las medianas decádicas (i.e. calculadas sobre un período de diez años) de las precipitaciones anuales para el período 1971-2010 (Tabla 4) en las estaciones del SMN en la región donde se encuentran las lagunas de nuestro interés, para identificar posibles cambios ocurridos durante el período de obtención de imágenes satelitales 1984 - 2015. Recordemos que la mediana de un conjunto de N datos ordenados de forma creciente, se define, en el caso de N impar como el valor posicionado en el medio de la sucesión mientras que, si es N es par, se le asigna el promedio de los dos valores centrales.

Tabla 4. Mediana de las precipitaciones decádicas por estación meteorológica expresada milímetros por año.

Serie	Azul	Benito Juárez	Olavarría	Tres Arroyos
1971-1980	994,4	671	872	773,85
1981-1990	955	878,55	915,55	890,2
1991-2000	970,65	893,7	940,5	841,25
2001-2010	864,55	827,9	818,4	731,65

Luego de calcular las medianas de las precipitaciones decádicas para cada una de las estaciones meteorológicas (Tabla 4), se observa a partir del año 2000 un marcado descenso en este valor (cercano al 10%). Este cambio en el régimen de precipitaciones podría tener consecuencias en la forma de la respuesta de las lagunas de la región respecto del incremento o reducción de su superficie y, por consiguiente, en el ajuste del modelo.

¿Cómo podemos vincular la variación del área con la precipitación antecedente y cantidad de días de precipitación?

Ya fue mencionado que no se sabe cuánto tiempo puede llevarle a una gota de agua de lluvia llegar hasta una laguna, en caso de que llegue. En realidad, se puede hacer una pregunta vinculada de una mejor manera al problema que se quiere resolver. Si nuestra laguna comienza a crecer y a ocupar una mayor superficie, podemos preguntarnos si responde a las lluvias que ocurrieron en la semana que pasó, o si debió acumularse la lluvia de meses (¿cuántos?) o de años (¿cuántos?) para que comencemos a notarlo. Y si la laguna se achica, ¿es porque hace días o semanas o meses que llueve menos? Puede suceder también que si llovió durante varios días un poco, la respuesta de la laguna no sea la misma que si llovió el mismo volumen total de una vez en un solo día. En este último caso el suelo pudo haberse saturado y entonces el agua se escurre en superficie llegando más rápido a la laguna, mientras que en el primer caso, con una precipitación menos intensa, el suelo puede ir absorbiendo el agua y llega a través del acuífero subterráneo más lentamente.

El análisis de regresión lineal permite considerar y ponderar diferentes variables explicativas y reconstruir una variable respuesta a partir de ellas. Lo que planteamos fue vincular el área en una fecha dada con las precipitaciones antecedentes acumuladas en un período dado y la frecuencia de días con precipitación en ese período. ¿Cuán largo debe ser ese período? Pues hay que determinarlo. Para ello se tomaron períodos de distintas longitudes: de tres días, siete días, treinta días, noventa días, ciento ochenta días, un año, dos años, tres años y cuatro años. Para el caso de las precipitaciones antecedentes, se sumaron las precipitaciones diarias ocurridas en los N días anteriores a la fecha de la imagen satelital respectiva, donde N toma los valores de 3, 7, 30, 90 y 180 días y 1, 2, 3 y 4 años, obteniendo así los valores de precipitaciones antecedentes acumuladas. De igual manera, contamos la cantidad de días en los que se registraron precipitaciones superiores a 0,1 mm en los períodos previos a la fecha de la imagen satelital de longitud N, con idénticos valores de N. Con esta información obtenida a partir de los registros de precipitaciones diarias de cada una de las estaciones meteorológicas mencionadas (Azul, Benito Juárez, Olavarría y Tres Arroyos), se construyó una Base de Datos (utilizando SQL, Structured Query Language, lenguaje diseñado para administrar y recuperar información de sistemas de gestión de bases de datos relacionales) con el objeto de calcular y almacenar la información y realizar consultas que generan insumos para el cálculo del “vínculo” área-precipitaciones.

Este análisis de regresión lineal se realizó tanto para la serie de datos completa (1984-2015) como para las series parciales 1984-2000 y 2001-2015 utilizando el software Infostat. La razón por la que decidimos partir la serie en estos dos períodos y analizarlos separadamente se debe a que observamos un cambio en las medianas decádicas tanto para Benito Juárez como para Olavarría (Tabla 4), lo cual sugería la posibilidad de que la laguna respondiera de manera diferente. Para cada período de

tiempo (1984 - 2015; 1984 - 2000; 2001 - 2015) se seleccionaron las variables con un nivel de significancia menor a 0,05 (ver Anexo) y se calculó (se reconstruyó) el área utilizando el método de regresión lineal múltiple a partir de las mismas. Se obtuvo así que, para el caso de la serie completa, el área puede ser explicada en términos de una combinación lineal de la precipitación antecedente de siete días, la precipitación antecedente de tres años y la frecuencia de días de lluvias de tres años. Eso se puede interpretar como que la memoria del sistema (tres años) es preponderante tanto como la precipitación en el corto plazo (siete días). En cambio para el caso de los dos subperíodos, para el primero (1984 - 2000) se explica el área en función de la precipitación antecedente de cuatro años y para la segunda parte (2001-2015) con la precipitación antecedente de dos y tres años y la frecuencia de días de lluvias de cuatro años. Esto nos habla de la memoria del sistema que, para el primer período es de mayor duración que para el segundo. En estos dos casos, el corto plazo no es significativo. En la Figura 15 se observa la dinámica del área de la laguna para los 3 casos antes mencionados.

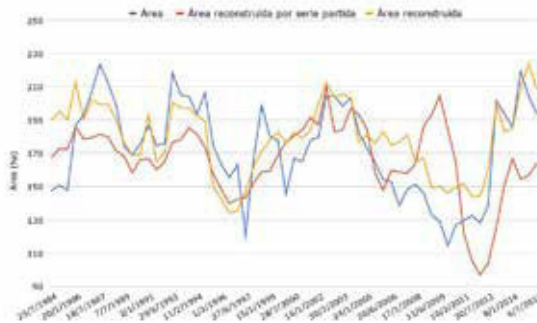


FIGURA 15. ÁREA DE LA LAGUNA LA BARRANCOSA CALCULADA A PARTIR DEL ÍNDICE MNDWI (AZUL), ÁREA RECONSTRUIDA CON EL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL PARA LOS PERÍODOS 1984-2000 (ROJO) Y PARA EL PERÍODO COMPLETO 1984-2015 (AMARILLO).

Si bien en este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la laguna La Barrancosa, no se puede establecer la bondad de un método, y mucho menos generalizar un resultado, habiéndolo aplicado a un único caso. Por ese motivo, este estudio fue también realizado en La Salada y El Chifle, otras dos lagunas cercanas a La Barrancosa, y en las lagunas La Tigra y Tres Lagunas, ambas ubicadas en el partido de Tres Arroyos. La laguna La Salada ($-37^{\circ} 24' 34.65''$, $-59^{\circ} 49' 8.8176''$) y laguna El Chifle ($-37^{\circ} 24' 12.9312''$, $-59^{\circ} 47' 41.3484''$) pertenecen al partido de Benito Juárez, y laguna La Tigra ($-38^{\circ} 20' 54.3552''$, $-60^{\circ} 26' 36.204''$) y la laguna denominada popularmente Tres Lagunas ($-38^{\circ} 20' 10.5972''$, $-60^{\circ} 6' 28.8''$) pertenecen al partido de Tres Arroyos.

La provincia de Buenos Aires está dividida en grandes cuencas, en particular, las lagunas arriba mencionadas están ubicadas en la gran cuenca del Río Salado Sur y en la cuenca de los Arroyos del Sur. En efecto, las lagunas El Chifle y La Salada están en la divisoria de cuencas entre ambas. La laguna La Barrancosa está en la cuenca alta (cabecera) del arroyo Tapalqué, que pertenece a la gran cuenca Río Salado Sur. Las tres lagunas son cercanas, por eso es oportuno el análisis de ellas tres y su comparación con las lagunas La Tigra y Tres Lagunas de Tres Arroyos, que están en la cuenca media del arroyo Claromecó, que pertenece a la gran cuenca de los Arroyos del Sur.

Las cinco lagunas comparten ciertas características: no están conectadas superficialmente con arroyos o canales artificiales, no se encuentran en la periferia de zonas urbanas, están inmersas en sistemas agrícolas y no están siendo manejadas en términos hidráulicos. En la Figura 16 se muestra la variación dinámica de las superficies de las cinco lagunas a lo largo del período 1984 - 2015 según las estimaciones brindadas a través del índice MNDWI.



FIGURA 16. DINÁMICA DEL ÁREA DE LAS 5 LAGUNAS ESTUDIADAS PARA LA SERIE 1984 - 2015 UTILIZANDO EL ÍNDICE MNDWI.

Así como para la laguna La Barrancosa se ponderaron los datos de las estaciones meteorológicas de Olavarría y Benito Juárez, por su ubicación geográfica para las lagunas El Chifle y La Salada se ponderaron los datos de las estaciones de Azul y Benito Juárez, y para las lagunas La Tigra y Tres Lagunas se tomaron los datos de la estación de Tres Arroyos.

En la Tabla 6 se puede observar que los coeficientes de determinación (R^2) indican una buena o muy buena reconstrucción del segundo período (2001 - 2015) en las cinco lagunas. El modelo que mejor explica la variación en el área de cada laguna en este segundo período resulta ser el que incluye las variables de precipitaciones antecedentes y frecuencias de días con precipitación de tres y cuatro años previos, es decir períodos más largos, lo cual señala que la memoria del sistema tiene mayor peso.

La reconstrucción en el primer período (1984 - 2000) es buena y muy buena sólo para las lagunas La Tigra y Tres Lagunas y el modelo que mejor la explica es el que considera variables de precipitaciones antecedentes y frecuencias de días con precipitación de tres y/o cuatro años previos y las precipitaciones antecedentes de 7 y 30 días. Aquí aparece que las precipitaciones más recientes tienen peso en la dinámica del área.

En todos los casos, el coeficiente de mayor peso de la regresión lineal es positivo lo que indica que en el segundo período, para todas las lagunas, la superficie estará directamente influenciada por la memoria del sistema y también, para las lagunas La Tigra y Tres Lagunas, por las precipitaciones a corto plazo durante el primer período.

Tabla 6. Análisis de regresión lineal realizado a los datos obtenidos en las cinco lagunas donde P_xd representa la precipitación acumulada durante los x días previos; P_xa representa la precipitación acumulada durante x años previos; #x d representa la frecuencia de x días previos con precipitación; y #x a representa la frecuencia de días con precipitación acumulada durante los x años previos. Se resalta en negrita la variable con mayor significancia, positiva en todos los casos excepto si se explicita (-). Se utilizó el método IDW lineal.

Laguna	Serie temporal	R ²	Variables explicativas
La Baramanca	1984-2015	0,57	P7d, P3a; #3a
	1984-2000	0,33	P4a
	2001-2015	0,91	P2a; P3a; #4a
La Salada	1984-2015	0,3	#3a; P4a
	1984-2000	0,35	P4a; #4a
	2001-2015	0,85	P2a; #2a; #3a; #4a
El Chufle	1984-2015	0,22	P3a; #4a
	1984-2000	0,11	P4a
	2001-2015	0,83	P3d; P7d; P90d; #2a; #3a; P4a
La Tigrá	1984-2015	0,64	#4a
	1984-2000	0,94	#3d; P30d; P90d; #90d; P180d; P1a; #1a; #2a; p3a; 4a
	2001-2015	0,76	#4a
Tres Lagunas	1984-2015	0,84	P3d; #3d; P7d; P30d; (-)#30d; #2a; #3a; #4a
	1984-2000	0,7	P7d; P180d; #3a
	2001-2015	0,89	P2a; #2a; #3a; #4a

Por otro lado, se analizó cuán vinculadas entre sí, en cuanto a sus variaciones espaciales, están las cinco lagunas. Es decir, saber si crecen o decrecen a la par. Para esto se realizó un análisis de regresión lineal de todas las lagunas contra todas, 1 a 1, tanto para la serie completa (1984 - 2015) como para la serie partida (1984 - 2000 y 2001 - 2015). En ambos casos se obtuvo una alta correlación ($R^2 \geq 0,67$) entre lagunas cercanas geográficamente y una muy baja correlación ($R^2 \leq 0,17$) para lagunas en diferentes cuencas. Para la serie 1984-2000 se mantienen estos “vínculos” aunque se enfatizan aún más: lagunas de una misma cuenca tienen una correlación mayor a 0,71 y en cuencas distintas una correlación menor a 0,11. Para la segunda mitad de la serie, 2001-2015, si bien se mantienen las altas correlaciones para lagunas cercanas geográficamente, se incrementan para lagunas de diferentes cuencas ($R^2 \leq 0,51$). Se observa así que, cuando las correlaciones entre lagunas son altas, la tendencia en la dinámica del área es similar. Por el contrario, cuando son bajas cada laguna tiene su propio “modelo” en cuanto a la reconstrucción.

La superficie libre de las lagunas ubicadas en el partido de Tres Arroyos muestra una reconstrucción diferencial según el período considerado. Para el primer período, 1984 - 2000, la reconstrucción es buena y se logra a partir de la memoria del sistema y, también, es relevante la precipitación acumulada en los días previos. Para el segundo período, 2001 - 2015, la reconstrucción es muy buena y se logra a partir de la memoria del sistema (tres y cuatro años precedentes).

La superficie libre de las lagunas ubicadas en el partido de Benito Juárez, aun perteneciendo a cuencas diferentes, logra reconstruirse sólo en el segundo período (2001 - 2015) a partir de la memoria del sistema (tres y cuatro años precedentes).

Los resultados obtenidos podrían indicar el tipo de aporte mayoritario a la laguna, es decir, subterráneo en los casos en que la memoria del sistema es relevante o bien su-

perficial en los casos en que la precipitación a corto plazo tiene mayor significancia. Es recomendable un estudio a campo para corroborar dicha presunción.

Conclusiones

El uso de imágenes satelitales presenta un abanico de posibilidades de uso muy amplio permitiendo la realización de análisis cuantitativos y cualitativos tanto temporales como espaciales. Además permite reducir los costos y tiempos de investigación en regiones de difícil acceso. Es posible, dada la frecuencia con la que el satélite captura las imágenes, construir una secuencia de datos que permita analizar y comprender el funcionamiento de las lagunas a nivel de cuencas, es decir a una escala espacial y temporal mucho más amplia que lo que permitiría el trabajo a campo.

Con el objetivo de vincular las variaciones en el área de las lagunas con el régimen de precipitaciones, se testearon diferentes algoritmos de procesamiento de imágenes satelitales en pos de determinar su eficiencia tanto en la capacidad de detección de superficies de agua libre como su costo computacional.

El cálculo del error global por diferentes métodos indica que el Índice de Diferencia Normalizada de Agua Modificado (MNDWI) es un método apropiado, además de ser práctica su implementación, para la identificación de las superficies lagunares y permite el cálculo del área de manera simple.

Del análisis interdecádico de las precipitaciones anuales en la región Sud-Este de la provincia de Buenos Aires se pudo detectar un cambio en el régimen de precipitaciones que, a su vez, muestra su efecto en la dinámica de las lagunas bajo estudio. El análisis utilizando el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) corroboró este hecho.

El análisis de regresión lineal permitió identificar la longitud del período de precipitaciones acumuladas y el número de días con precipitaciones que mayor incidencia tienen en la dinámica de la laguna y que permiten la reconstrucción de su área. Cabe notar que no se han tenido en cuenta los procesos de evaporación y evapotranspiración como tampoco la temperatura ambiente y el viento, lo cual explica las diferencias en la reconstrucción del área respecto de lo calculado directamente de las imágenes Landsat. También se puede destacar la diferencia en las respuestas obtenidas cuando se realizó la reconstrucción del área con la serie completa o bien con las dos subseries. Esto podría estar causado por un cambio en el uso del suelo que implicaría distinta capacidad de infiltración del agua precipitada y una tendencia mayor al escurrimiento.

Se desarrolló una metodología de trabajo que combina todas estas herramientas que, en conjunto, permiten analizar la dinámica del área de una laguna en la región Pampeana. Ésta metodología puede ser aplicada para analizar cualquier laguna en cualquier cuenca, siempre y cuando se pueda contar con datos de precipitación locales.

La importancia de la función que cumplen las lagunas en la ecorregión pampeana y sus ecosistemas naturales y productivos amerita profundizar en estudios que vinculen las variables climáticas con la dinámica propia de las lagunas, sobre todo ante los escenarios que plantea el cambio climático.

Bibliografía

Dangavs, N. V. 2005. Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires. En: R. E., Barrio, R. O., Etcheverry, M. F., Caballé & E. J., Llambías (eds.) Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino Buenos Aires (Argentina). Universidad Nacional de La Plata. La Plata. 219-236.

Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C. y Rummukainen, M. 2013. Evaluation of Climate Models. En: T. F. Stocker, D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge and New York. 741-866.

Grosman, F. 2008. Espejos en la llanura: Nuestras lagunas de la región pampeana. Editorial Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Buenos Aires.

McFeeters, S. K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International journal of remote sensing, 17(7): 1425-1432.

Richards, J. A. 1999. Remote sensing digital image analysis, Volume 3. Springer, Berlin.

Ringuelet, R. A. 1962. Rasgos principales de las lagunas pampeanas con criterio bioecológico. Anales CIC, 3.

Xu, H. 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International journal of remote sensing, 27(14): 3025-3033.

Anexo

Análisis de regresión lineal: breve descripción del método

El análisis de regresión lineal es una técnica estadística utilizada para estudiar la relación entre variables. Se utiliza en diversas áreas del conocimiento. Por ejemplo, por medio de una regresión lineal se puede relacionar el diámetro que los troncos de los árboles en una plantación forestal alcanzarán en función de la distancia entre ellos al plantarlos; o también establecer relaciones morfométricas para una especie dada. En Ecología también tiene múltiples aplicaciones, por ejemplo en la exploración de la medida en que el cambio en la temperatura del agua de un cuerpo de agua está asociado con la profundidad del mismo.

Puede utilizarse para explorar y cuantificar la relación lineal entre una variable a la que llamamos dependiente (y) y una o más variables llamadas independientes o predictoras (x_1, x_2, \dots, x_m) u obtener predicciones de la variable dependiente a partir de las independientes. El objetivo es poder hallar coeficientes c_0, c_1, \dots, c_m de manera tal que la recta $y = c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_mx_m + E$ haga mínima la suma de los cuadrados de las distancias entre cada punto y la recta, donde E representa el error. Esto significa que, de todas las posibles rectas que pasa por la nube de puntos, existe una

única recta que hace que las distancias sean mínimas. Si la variable dependiente y es función de las variables predictoras x_k , los coeficientes correspondientes c_k indican en qué medida cada variable predictora contribuye a la variable dependiente y .

Por ejemplo, en el caso de la laguna La Barrancosa las variables predictoras x_k son las precipitaciones antecedentes acumuladas para 3, 7, 30, 90 y 180 días y 1, 2, 3 y 4 años, y la cantidad de días en los que se registraron precipitaciones superiores a 0.1 mm para igual período de tiempo que en el caso de las precipitaciones antecedentes. La relación que obtuvimos, para el caso de la serie completa (1984 - 2015) fue:

$$area \approx 0,32 P7d + 0,04 P3a + 0,48 \#3a$$

donde Pxd representa la precipitación acumulada durante los x días previos; Pxa representa la precipitación acumulada durante x años previos y $\#xa$ representa la cantidad de días con precipitación acumulada durante los x años previos. Los coeficientes de la precipitación acumulada en los siete días previos y la cantidad de días con precipitación previos de tres años hacen un mayor aporte en la reconstrucción del área que la precipitación acumulada de tres años previos. Además de poder encontrar los coeficientes c_i es necesario contar con alguna medida para saber cuán bueno es el ajuste realizado por la recta. Existen diferentes formas de ver el grado con el que la recta ajusta a la nube de puntos, sin embargo, el más utilizado es el coeficiente de determinación R^2 que es una medida estandarizada que toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independientes entre sí y 1 cuando entre ellas existe una relación "perfecta"), nos dice cuál es la proporción de la varianza de la variable dependiente, área en nuestro caso, que es explicada o predecida por las variables independientes, precipitación acumulada y frecuencia de días de lluvia. Cuando se habla del nivel de significancia con el que se trabaja se tiene en mente a la probabilidad de tomar la decisión de rechazar la hipótesis nula cuando ésta es verdadera (decisión conocida como error de tipo I, o falso positivo). La decisión se toma a menudo utilizando el p -valor, es decir que si el p -valor es inferior al nivel de significación, entonces la hipótesis nula es rechazada. Cuanto menor sea el p -valor, más significativo será el resultado.