

CAPÍTULO 7



Utilidad del monitoreo lagunar ambiental con boyas multiparamétricas en la región pampeana: Laguna La Barrancosa

María B. Alfonso, Alejandro J. Vitale, Gerardo M. E. Perillo y María C. Piccolo

Introducción

Los ecosistemas acuáticos a nivel mundial se encuentran afectados por las actividades antropogénicas. Estas causan efectos negativos, entre los que se pueden citar cambios en su nivel hidrológico, el aumento en la carga de nutrientes, contaminación, ingreso de especies exóticas y el calentamiento global (Vitousek et al., 1997; Carpenter et al., 2011). La resolución de estos problemas depende en gran medida de la comprensión holística de los procesos complejos que rigen la dinámica de los cuerpos de agua y cómo se ven afectados por los procesos climáticos y antropogénicos. Los avances en la tecnología de sensores brindan la oportunidad de monitorear múltiples variables ecológicas claves en escalas temporales que no son posibles con las técnicas de muestreo convencional.

Los sensores automáticos poseen un amplio campo de aplicación, abarcando desde monitoreos ecológicos hasta actividades experimentales. Se destacan por permitir mediciones en mayor frecuencia además de alcanzar una cobertura espacial mucho mayor que la alcanzada a través de la observación humana. Como resultado, las mediciones de los parámetros se pueden realizar en lugares de difícil o imposible acceso (Porter et al., 2009). Por otro lado, tanto las investigaciones biológicas como ecológicas se basan en observaciones, teorías y modelos, cuya efectividad será mejor siempre que las escalas temporales, espaciales y cuantitativas de las variables estudiadas sean comparables.

Las boyas de monitoreo ambiental son sistemas modulares de bajo costo que permiten el acceso a los datos por conexión remota (Vitale et al., 2018). Permiten mejorar ampliamente las escalas de observación en el eje espacial y temporal y con ello, probar una amplia gama de teorías y modelos ecológicos que brindarán un mejor entendimiento de la dinámica de ecosistemas (Alfonso, 2018).

En los lagos y lagunas los procesos son complejos, abarcando una superposición tanto de escalas temporales como de niveles tróficos. Por lo tanto, cuando medimos las variables ecológicas, la elección de la frecuencia y el período de muestreo es clave para capturar y entender los patrones de evolución temporal de estas variables. Por lo tanto, frente a desafíos que suponen tanto el cambio climático como el uso intensivo de las cuencas hídricas, es fundamental mejorar el monitoreo de las variables biológicas, fisicoquímicas y meteorológicas. La disponibilidad de mejor información y en frecuencias mayores a las propuestas por los métodos tradicionales, permitirán evaluar el efecto sinérgico, acumulativo y no lineal de los múltiples factores de estrés que afectan a los ecosistemas acuáticos en general y en especial las lagunas pampeanas por su elevada dinámica, para así tomar mejores decisiones de manejo (Brown et al., 2013). La mayoría de los monitoreos ambientales se basan en mediciones periódicas in situ de escala semanal, mensual, estacional o anual. Esta frecuencia temporal impide la detección de procesos asociados a eventos epi-

sódicos hidrológicos y meteorológicos que afectan la dinámica a partir de los cuales las comunidades biológicas se ven afectadas a corto o largo plazo (Jennings et al., 2012). A pesar de la utilidad de los muestreos en baja frecuencia, la naturaleza discreta de los datos resulta en faltantes importantes en el conocimiento en relación a procesos asociados a organismos con plazos de vida cortos, eventos climáticos extremos o cualquier proceso cuya escala temporal sea menor al tiempo propuesto entre muestreos (Marcé et al., 2016). Las mediciones en baja frecuencia pueden ser reemplazadas o complementadas por mediciones automatizadas en alta frecuencia. Variables meteorológicas como la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y variables parámetros limnológicos como la temperatura del agua, conductividad eléctrica, concentración de oxígeno disuelto, entre otras, son fáciles de medir en alta frecuencia con el uso de boyas y ya son ampliamente usadas actualmente a nivel mundial en lagos y lagunas para diversos fines (Staher et al., 2010; Jennings et al., 2012; Woolway et al., 2015; Tsai et al., 2016).

Redes como Networking Lake Observatories en Europa (NETLAKE) y Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON) actualmente trabajan en coordinar esfuerzos de numerosos grupos de investigación a escala global para proporcionar información en alta frecuencia de lagos y lagunas de diferentes características mediante el empleo de boyas automatizadas. Sin embargo, dos tercios de los estudios se realizan en lagos estratificados de América del Norte y Europa durante la época libre de hielo (Meison et al., 2015). En Argentina, el Proyecto Argentino de Prospección de Ambientes Acuáticos (PAMPAA) financiado por CONICET (2012-2018) fue pionero en la implementación de boyas de monitoreo ambiental autónomo. Esta red involucró un gran número de profesionales en distintas disciplinas, combinando muestreos tradicionales con teledetección con imágenes satelitales y mediciones en alta frecuencia con boyas automatizadas para un mejor entendimiento de las lagunas someras pampeanas.

Las boyas EMAC en el proyecto PAMPAA

En la región pampeana se contabilizan más de 200.000 lagunas (Dangavs, 2005), las cuales se encuentran bajo una presión agrícola ganadera que se incrementa día a día. Esto, sumado al efecto del cambio climático, con su consecuente modificación de temperaturas y precipitaciones (Fischer y Knutti, 2015), y el cambio del uso de la tierra ganadera y de cultivos tradicional a monocultivos intensivos de soja hacen que necesitemos tomar medidas de manejo más precisas y basadas en la mejor calidad de información disponible. Además de los servicios ecosistémicos que poseen como provisión de agua, reciclaje de nutrientes, recreación, pesca, etc., las lagunas se caracterizan por responder rápido a los cambios en el clima y en el uso de la tierra, por lo cual son consideradas centinelas del cambio climático (Adrian et al., 2009; Williamson et al., 2009, 2014). Por lo tanto, los estudios medioambientales a largo plazo en las lagunas nos aportan información valiosa para el entendimiento de su funcionamiento y el seguimiento de los cambios complejos que ocurren en sus cuencas. El proyecto PAMPAA, cubre un rango geográfico amplio, y su objetivo principal es estudiar las lagunas de la región pampeana en relación a los impactos antrópicos y al cambio climático (Diovisalvi et al., 2015). Para ello se seleccionaron 13 sitios de estudio a lo largo de un gradiente de precipitación y en 6 de ellos se instalaron boyas multiparámetricas (Figura 1) para evaluar el efecto de las variables climáticas, fisicoquímicas y antropogénicas.

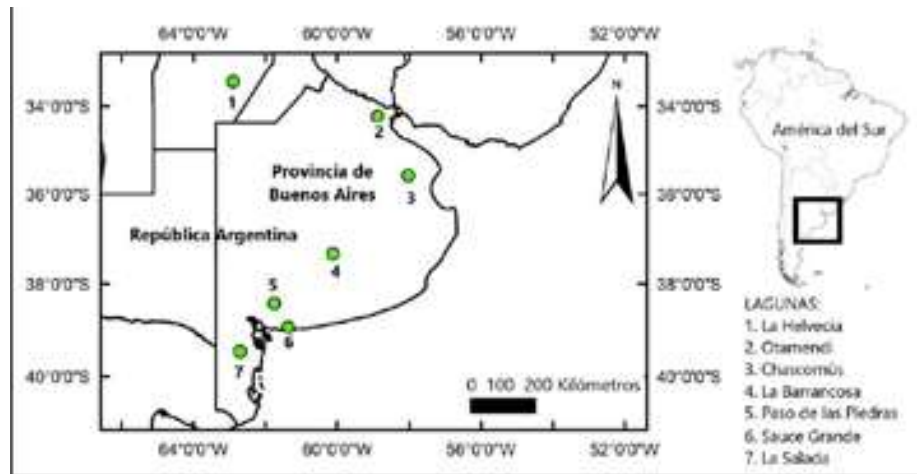


FIGURA 1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS BOYAS EMAC EN LA REGIÓN PAMPEANA. MODIFICADO DE VITALE ET AL., 2018

Diseño de las boyas EMAC

Las boyas denominadas EMAC (Estación de Monitoreo Ambiental Costero) (Figura 2) fueron diseñadas y manufacturadas por un grupo de investigadores en el Instituto Argentino de Oceanografía (IADO-CONICET, Bahía Blanca, Argentina). Son sistemas modulares de bajo costo que permiten el acceso a los datos por conexión remota. Además, la estandarización de su diseño permite gran flexibilidad en su funcionamiento y configuración de los sistemas que la componen de acuerdo a las características del sitio de estudio (Vitale et al., 2018); es decir, el sistema se adapta a las condiciones locales y no al revés como sucede con muchos sistemas comerciales. A continuación se describirá en mayor detalle los elementos que la componen.

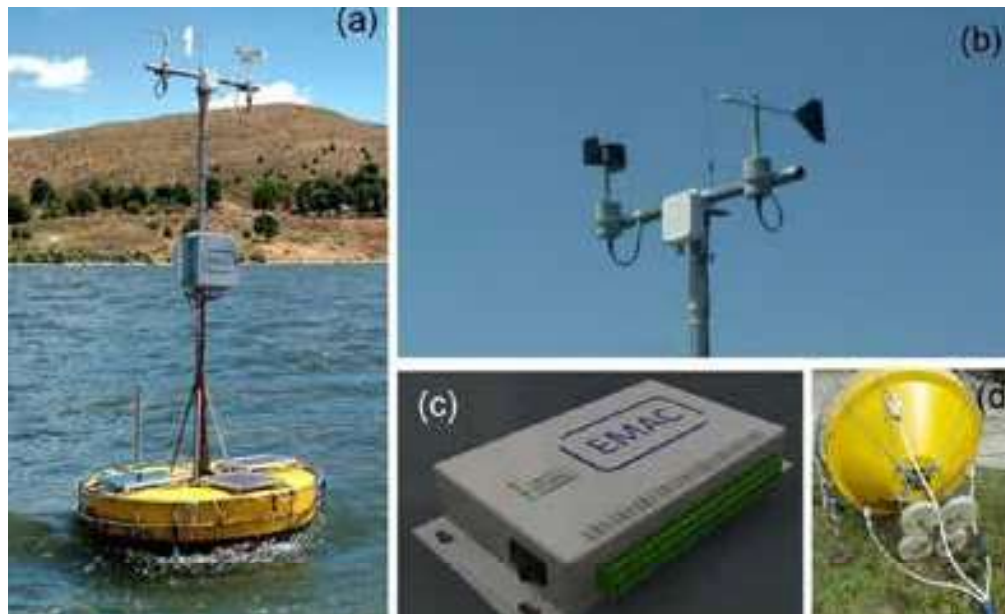


FIGURA 2. BOYA EMAC Y DETALLE DE SUS PRINCIPALES COMPONENTES. (A) VISTA GENERAL DE LA BOYA; (B) ESTACIÓN METEOROLÓGICA; (C) ADQUISIDOR DE DATOS CENTRAL; (D) CONTRAPESOS DE HIERRO EN LA PARTE INFERIOR.

El adquirente de datos (datalogger) es un sistema compacto dónde ocurre el procesamiento, almacenamiento de información, administración de energía y la comunicación remota. El utilizado en las boyas, consta de nueve entradas, ocho de las cuales son analógicas (Figura 2c) permitiendo así la integración de sensores comerciales preexistentes a través de sus entradas analógicas. Además posee la característica adicional de interconectar con otros adquirentes, incrementando así la cantidad de entradas para un mayor número de sensores. Este posee una capacidad de almacenamiento de hasta 110 días si el período de muestreo es de 10 minutos; los datos pueden ser tanto descargados manualmente como enviados a un servidor central.

La boya cuenta además con un software de control el cual funciona tanto con el sistema operativo de Windows, Linux o MacOS. Gracias a su interfaz intuitiva puede ser utilizado por un operador, sin necesidad de tener conocimientos avanzados en computación. A través del mismo se puede configurar cada parámetro, habilitar o deshabilitar una entrada, seleccionar la frecuencia de muestreo y descargar los datos, entre otras acciones. Esta última opción da lugar a la posibilidad de comprobar el adecuado funcionamiento del todo el sistema y de cada sensor durante la instalación y en cada visita de control y limpieza. Los datos a su vez se almacenan de tal forma que una vez descargados pueden ser vistos en una gran variedad de formatos. Por último, una vez que el servidor recibe los datos y los almacena, tanto los valores instantáneos como acumulados a lo largo del tiempo pueden ser visualizados en una interfaz web (Figura 3), dónde los datos acumulados se encuentran disponibles, en diferentes resoluciones temporales (ej., datos horarios, diarios).



FIGURA 3. VISTA DE LA PÁGINA WEB DE LA RED DE ESTACIONES EMAC (IZQUIERDA) Y DATOS INSTANTÁNEOS DE UNA BOYA DE LA RED PAMPA2 (DERECHA). DISPONIBLE EN LÍNEA EN [HTTP://EMAC.CRIBA.EDU.AR/2019/](http://EMAC.CRIBA.EDU.AR/2019/).

En el grupo de trabajo EMAC se desarrollaron múltiples sensores y dispositivos de bajo costo para monitorear tanto los parámetros del aire como del agua. Las boyas están equipadas con un conjunto de sensores para medir las distintas variables físico-químicas en el agua que, dependiendo del tipo de estudio, pueden incluir temperatura, conductividad eléctrica, turbidez, nivel o profundidad, concentración de oxígeno disuelto y clorofila *a*. A su vez, las boyas contienen en su parte superior una estación meteorológica que mide diferentes variables como la temperatura, radiación solar o neta, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. También cuenta posee un compás interno para corregir la dirección del viento en función de la libre rotación de la boya. Todos los sensores son previamente calibrados antes de su uso. Se destaca que, debido al movimiento propio de la boya, el uso de sensores estándar de precipitación no es factible por lo que no se incluye este parámetro en las boyas. En la Tabla 1 se presentan las principales especificaciones de los parámetros mencionados y se describen los diseños más innovadores llevados a cabo. El sensor integrado de conductividad eléctrica y temperatura está basado en el principio inductivo y en un termistor NTC, respectivamente (Figura 4a). El cuerpo del sensor está construido en acero inoxidable, con una cabeza de plástico impresa en 3D, muy resistente a los impactos y resistente al agua.



FIGURA 4. VISTA GENERAL DE LOS PRINCIPALES SENSORES. A) CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA; B) NIVEL DEL AGUA Y TEMPERATURA; C) SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN; Y D) TEMPERATURA DEL AIRE, VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO.

Para la detección simultánea del nivel de agua y la temperatura se desarrolló un sensor dual que utiliza un sensor de presión de silicio integrado (Figura 4b). El cuerpo del sensor está construido en acero inoxidable y la cabeza es una cabeza de plástico impresa en 3D. A su vez, posee un tubo de polipropileno, al que se conecta el cable, para la ventilación del aire y en otros casos se utiliza una electrónica externa para la compensación como se presenta en la Figura 4b. Los sedimentos en suspensión se miden a partir de un sensor de retro dispersión óptica. Las partes del sensor (cuerpo y cabeza) son similares a las del sensor de conductividad (Figura 4c). El sensor de velocidad del viento se basa en un sensor óptico reflectante para contar las revoluciones. El cuerpo del sensor está construido en acero inoxidable y poliacetal (Delrin®). El diseño del rotor (tipo Savonius) consiste en una pieza robusta y simple impresa en 3D.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de los parámetros medidos en las boyas

Parámetro	Rango	Precisión	Req. energético	Gasto energético	Transductor/ Principio	Manufacturador
Temperatura	-20 a 60 °C	±0,2 °C	9-15 V	2 Ma	NTCLE203 E3103SB0	Grupo EMAC
Humedad relativa	0 a 100 %	± 2 %	9-15 V	2 mA	HIH4001	Grupo EMAC
Velocidad viento	0 a 50 m s ⁻¹	± 2 %	9-15 V	3 mA	TCRT1000	Grupo EMAC
Dirección viento	0 a 360°	± 2 %	9-15 V	2 mA	6187R10KL 1.0LF	Grupo EMAC
Radiación solar	0-1250 W m ⁻²	± 7 %	9-15 V	5 mA	BPW20RF	Grupo EMAC
Radiación Neta	-300-2000 W m ⁻²	± 5 %	9-15 V	5 mA	NR Lite2	Kipp y Zonen
Nivel del agua	0 a 10 m	± 0,01m	9-15 V	7 mA	MPX5100D P	Grupo EMAC
Conductividad	0 a 25 mS	± 2 %	9-15 V	60 mA	TOROIDAL	Grupo EMAC
Sedimento suspensión	0-1000 mg L ⁻¹	±3 %	9-15 V	35 mA	OPB730F	Grupo EMAC
Clorofila a	0-500 µg L ⁻¹	± 1 %	12 V	20 mA	Cyclops-7F	Turner Desings
Oxígeno disuelto	0-200 %	± 1 %	12-36 V	30 mA	DO6440	Sensorex

Mantenimiento de la boya

Los sensores que se encuentran inmersos en el agua normalmente requieren un mayor mantenimiento que los que se encuentran en la estación meteorológica. Particularmente, los sensores ópticos como el de sedimentos en suspensión y concentración de clorofila a son los que requirieron mayor mantenimiento. En el caso de las lagunas pampeanas, al ser someras, la disminución evidente del nivel de agua suele ir acompañada de un aumento del sedimento en suspensión que afecta la sensibilidad de los sensores ópticos. Por ejemplo, en el caso del sensor de oxígeno disuelto, se han observado errores en sus mediciones por la presencia de material biológico como algas o sedimento que obstruyeron el sensor y perturbaron la continuidad de las mediciones. Por lo tanto, es necesario el mantenimiento local de las boyas, con tareas de limpieza periódicas, al igual que el control de la calibración (Figura 5).



FIGURA 5. VISTA DEL PROCESO DE INSTALACIÓN, RETIRO PARA LIMPIEZA Y REINSTALACIÓN DE LA BOYA “LA BARRANCOSA”.

Antecedentes locales e internacionales

Día a día se incrementa el uso y aplicación de las boyas multiparamétricas a nivel mundial para el estudio de sistemas acuáticos. Los datos fisicoquímicos y meteorológicos obtenidos se han implementado en diversos estudios como por ejemplo sobre hidrodinámica (Wüest y Lorke, 2003; Klug et al., 2012), determinación del metabolismo ecosistémico (van de Bogert et al., 2007; Staehr et al., 2010; Alfonso et al., 2014), efecto de eventos climáticos episódicos en los lagos (Jones et al., 2008; Shade et al., 2009; Jennings et al., 2012), transferencia de gas en la interfaz aire-agua (Read et al., 2012), determinación del flujo de calor sensible y latente (Woolway et al., 2018) entre otros. Para ello se han desarrollado numerosos programas y códigos de programación para interfaces como Matlab, Python o R Project, que facilitan el análisis de las variables en alta frecuencia. Entre ellos podemos citar al General Lake Model (GLM) que es un código de fuente abierta unidimensional diseñado para simular la hidrodinámica de lagos, embalses y humedales (Hipsey et al., 2019). Otro modelo ampliamente usado es Lake Analyzer, un conjunto de herramientas desarrolladas por miembros de GLEON que les permite a los usuarios calcular métricas comunes para los estados físicos de los lagos, como la estabilidad de Schmidt y el número de Wedderburn, entre otras. Los scripts fuentes (Matlab) están disponibles de forma gratuita y son de código abierto (Read et al., 2011). También se encuentra la herramienta Lake Heat Flux Analyzer (LHFA, Woolway et al., 2015), la cual se desarrolló para permitir el cálculo de los flujos de calor (ej. calor sensible, latente, etc.) y los términos relacionados, a partir de la medición de las variables meteorológicas en alta frecuencia en lagos. Este software también se puede utilizar con datos meteorológicos medidos en tierra, pero los resultados no serán tan precisos. Por otro lado, Lake Metabolizer es un paquete para R para estimar el metabolismo ecosistémico de un cuerpo de agua a partir de datos de oxígeno disuelto en agua en alta frecuencia recolectados por estaciones de monitoreo in situ (Winslow et al., 2016).

En Argentina el uso de boyas multiparamétricas es totalmente novedoso, cuya primera implementación a gran escala se desarrolló a partir del proyecto PAMPAA. Las boyas autónomas EMAC se colocaron en 6 de las lagunas que forman parte de este proyecto en un gradiente Norte-Sur de precipitación y temperatura: La Helvecia (32°25'S, 62°53'O), Otamendi (34°13'S, 58°52'O), Chascomús (35°36'S, 58°02'O), La Barrancosa (37°20'S, 60°06'O), Sauce Grande (38°56'S, 61°20'O) y La Salada (39°27'S, 62°41'O) (Figura 1). Entre los estudios realizados a partir de datos en alta frecuencia se pueden citar el estudio de la hidrografía de la laguna Sauce Grande (Fornerón, 2016), el estudio del metabolismo ecosistémico a partir de datos en alta frecuencia en las lagunas Sauce Grande y La Salada (Alfonso et al., 2015; 2018), y su aplicación en el estudio del plancton en relación al manejo lagunar y la variabilidad climática (Alfonso et al., 2017) entre otros trabajos en desarrollo.

Caso de estudio: Laguna La Barrancosa

La Barrancosa es una laguna que se encuentra ubicada en la región centro de la provincia de Buenos Aires. A partir de su inclusión en el proyecto PAMPAA, se colocó una boya EMAC en el sector central (Figura 5). En la misma se midieron las siguientes variables: Temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (km/h), dirección del viento, conductividad (mS/cm), temperatura del agua (°C), sedimento en suspensión (mg/L) y nivel hidrométrico (m). Fueron medidas cada 10 minutos en el período que abarca desde febrero del 2013 hasta noviembre de 2016.

VARIABLES CLIMÁTICAS

Como resultado del análisis de los registros, la temperatura del aire (T_a) presentó un valor medio de $14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el período de estudio, con un marcado patrón estacional (Figura 6a). Las temperaturas mínimas se registraron en los meses de invierno alcanzando los $-4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en verano se registró una temperatura máxima de $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (febrero del 2015). Se registraron temperaturas elevadas superiores a los $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 4 días del verano de 2013, 5 días del verano de 2014 y en 8 días del 2015, siendo este último el verano más caluroso del período analizado. Su patrón diario fue el esperado alcanzando temperaturas máximas luego de las horas del mediodía y mínimas durante la madrugada (Figura 7a). El análisis de las anomalías en la T_a , arrojó valores negativos para el período que abarca desde mayo a septiembre de 2013 y desde junio a septiembre de 2014, mientras que el resto de los meses presentó anomalías positivas, reflejando una marcada estacionalidad (Figura 8a).

La humedad relativa (HR) presentó un valor medio de 82% , con un patrón estacional no tan marcado como en el caso de la T_a (Figura 6a), pero mostró significativas fluctuaciones diarias, alcanzando máximos de saturación durante las horas de la noche y mínimos durante el día, principalmente en los meses invernales (Figura 7a).

Por último la velocidad del viento (Vel), presentó un valor medio de $16,4\text{ km/h}$, sin un marcado patrón estacional (Figura 6b). Sin embargo, sus fluctuaciones diarias mostraron un aumento al mediodía y una disminución en las horas de la noche, acompañando, similar a la HR, las fluctuaciones diarias en la T_a (Figura 7b). El análisis de las anomalías en Vel reflejó una tendencia a valores mayores durante los meses de primavera del 2013 mientras que durante el 2014 este patrón no fue tan claro (Figura 8b). La dirección predominante del viento fue del Norte abarcando un 35% del período analizado, mientras que las mayores velocidades se registraron en dirección SSE con una velocidad media de 20 km/h , abarcando solo un $3,04\%$ del período de estudio.

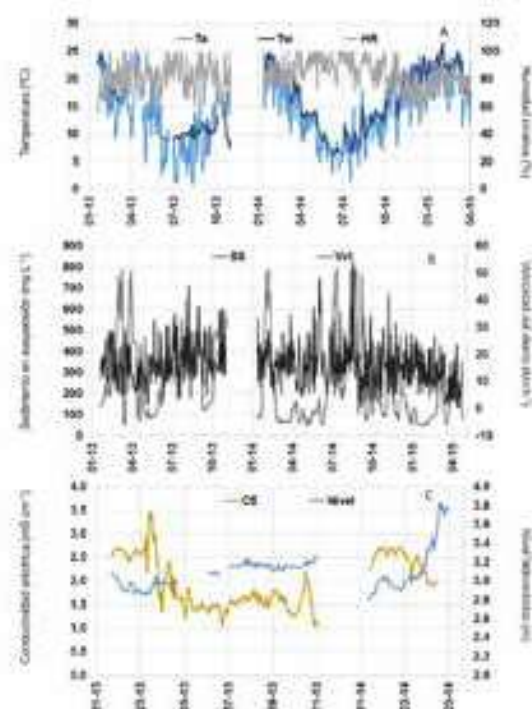


FIGURA 6. VARIABLES LIMNOLÓGICAS Y METEOROLÓGICAS DIARIAS MEDIDAS DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO EN LA LAGUNA LA BARRANCOSA:
 (A) TEMPERATURA DEL AGUA (T_w), TEMPERATURA DEL AIRE (T_a) Y HUMEDAD RELATIVA (HR), (B) VELOCIDAD DEL VIENTO (VEL) Y SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN (SS); (C) NIVEL HIDROMÉTRICO (NIVEL) Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).

VARIABLES LIMNOLÓGICAS

La temperatura del agua (T_w) presentó un claro patrón estacional alcanzando un valor mínimo de $5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en invierno y un valor máximo de $28,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en verano (Figura 6a). La T_w superó los $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ en 7 días de verano del 2013, en 5 días del 2014 y 11 días del 2015. Evidentemente, el año 2015 fue el verano más cálido del período de estudio. El análisis de las anomalías, coinciden con este patrón estacional con valores positivos para los meses de verano y negativos en los meses de otoño, invierno y principio de la primavera (Figura 8c). Respecto a sus fluctuaciones diarias también fueron bien marcadas, con valores mínimos en las horas de la mañana aumentando hacia el mediodía (Figura 7b). La conductividad eléctrica (CE) presentó un valor medio de $2,07\text{ mS/cm}$, clasificando a esta laguna como un cuerpo de agua subsalino (Hammer, 1986). Esta variable mostró un patrón estacional claro, respondiendo a los cambios en la T_a y T_w (Figura 6 a y c), pero también reflejando los cambios en el nivel del agua, ya que a mayor nivel de agua se observó una disminución en la CE (Figura 6c). Respecto a sus fluctuaciones diarias, siguieron el mismo patrón que la T_a , mostrando un desfase adelantado con respecto a las variaciones en la T_w , lo cual podría indicar que responde más rápido ante los cambios de la T_a (Figura 7a y c). Respecto a la concentración de sedimento en suspensión (SS), presentó un valor medio de 251 mg/L , fluctuando entre 50 y 800 mg/L , lo cual caracterizaría a la laguna como un cuerpo de agua turbio. El SS no presentó un patrón estacional claro, pero se observan sus fluctuaciones diarias (Figura 6b y 7b) al aumentar la velocidad del viento, lo cual se explicaría por un efecto de resuspensión de los sedimentos.

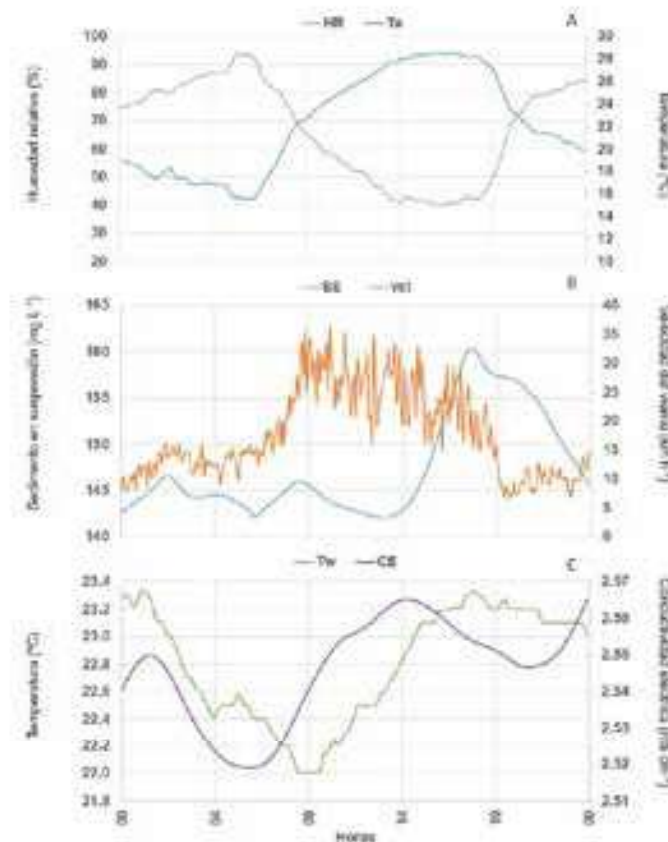


FIGURA 7. VALORES CADA 10 MINUTOS DE LAS VARIABLES LIMNOLÓGICAS Y METEOROLÓGICAS MEDIDAS DURANTE UN DÍA COMPLETO EN LA LAGUNA LA BARRANCOSA: (A) LA TEMPERATURA DEL AIRE (T_A), LA HUMEDAD RELATIVA (HR), (B) LA VELOCIDAD DEL VIENTO (VEL) Y EL SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN (SS) Y (C) LA TEMPERATURA DEL AGUA (T_w), Y LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE).

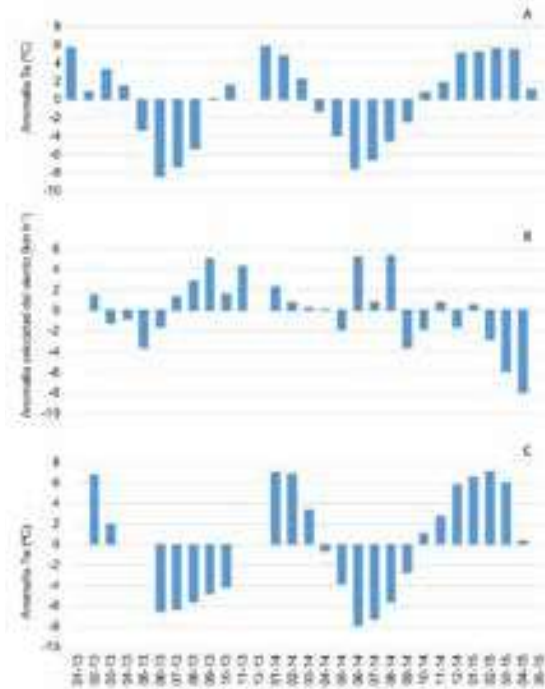


FIGURA 8. ANOMALÍAS MENSUALES DE (A) LA TEMPERATURA DEL AIRE (TA), (B) LA VELOCIDAD DEL VIENTO (VEL) Y (C) LA TEMPERATURA DEL AGUA (TW) DURANTE EL PERÍODO DE ESTUDIO EN LA LAGUNA LA BARRANCOSA.

Relación entre las variables limnológicas y climáticas

Las principales relaciones observadas entre las variables limnológicas y climáticas se confirmaron a partir de un análisis de correlación de Spearman. La HR se correlacionó negativamente con la Ta y positivamente con la velocidad del viento y el nivel del agua ($p < 0,01$; Tabla 2). A su vez la Ta se correlacionó positivamente con la Tw y la CE y negativamente con el nivel de la laguna ($p < 0,01$; Tabla 2). A su vez la CE se correlacionó positivamente con la Ta y la Tw ($p < 0,01$) y negativamente con el nivel de la laguna ($p < 0,01$). Estos resultados confirman el efecto de la Ta como principal regulador del nivel del agua y la salinidad de la laguna. Por otro lado, el SS no se correlacionó con ninguna de las variables estudiadas, posiblemente porque el aumento en la concentración de SS no es inmediato y se ve desfasado unas horas respecto del aumento en la velocidad del viento (Figura 7).

Tabla 2. Resultados del análisis de correlación de Spearman entre las variables limnológicas y meteorológicas medidas en alta frecuencia durante el periodo de estudio. * $p < 0,05$ ** $p < 0,01$. Referencias en el texto.

	TA	HR	VEL	DIR	COND	TW	SS	NIVEL
TA								
HR	-0,397**							
VEL		0,165**						
DIR			-0,085*					
COND	0,532**							
TW	0,860**	-0,430**	-0,116**		0,892**			
SS								
NIVEL	-0,527**	0,234**			-0,668**	-0,619**		

Conclusiones

De acuerdo al estudio y análisis de las variables medidas en alta frecuencia en la laguna La Barrancosa, se observa que es una típica laguna pampeana, de baja salinidad y con elevados valores de turbidez. Se observaron fluctuaciones diarias en estas variables producto de los cambios tanto en la temperatura del aire y la velocidad del viento que aumentan la evaporación y, por lo tanto, la concentración de sales en la laguna; por otro lado, quedó manifiesto el efecto del viento que provoca la resuspensión de los sedimento en el fondo de la laguna. Ello coincide con lo observado en otras lagunas pampeanas (Torremorell et al., 2009; Lagomarsino et al., 2015). A su vez se visualizó el efecto de las variaciones en la T_a en los parámetros de T_w , HR, CE y Vel. Al aumentar la T_a , luego de unas horas origina un aumento en la T_w y CE de la laguna, lo cual confirma la caracterización de las lagunas someras como La Barrancosa, como centinelas de la variabilidad climática (Williamson et al., 2009). Este tipo de variaciones solo es posible visualizarlas gracias a la medición de parámetros en alta frecuencia, ya que con datos mensuales sería imposible registrar estas respuestas inmediatas en las variables limnológicas a los cambios atmosféricos. Si bien estos resultados son preliminares, permiten vislumbrar las posibilidades de estudios más profundos para comprender las interacciones entre el agua y la atmósfera y la respuesta general del ecosistema. El uso de las boyas multiparamétricas permitió la realización de múltiples estudios en diferentes lagunas de la Región Pampeana. Asimismo demostraron que el monitoreo en alta frecuencia es una herramienta fundamental para el entendimiento de los sistemas lagunares de la Región Pampeana y su funcionamiento.

Bibliografía

Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., y Weyhenmeyer, G. A. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*, 54: 2283-2297.

Alfonso, M. B. 2018. Estructura y dinámica del zooplancton en una laguna con manejo antrópico: laguna La Salada (Pedro Luro, pcia. de Buenos Aires). Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur.

Alfonso, M. B., Vitale, A. J., Menéndez, M. C., Perillo, V. L., Piccolo, M. C., y Perillo, G. M. E. 2015. Estimation of ecosystem metabolism from diel oxygen technique in a saline shallow lake: La Salada (Argentina). *Hydrobiologia*, 752(1): 223-237.

Alfonso, M. B., Zunino, J., y Piccolo, M. C. 2017. Impact of water input on plankton temporal dynamics from a managed shallow saline lake. In *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 53: 391-400.

Alfonso, M., Brendel, A., Vitale, A., Seitz, C., Piccolo, M., y Perillo, G. 2018. Drivers of Ecosystem Metabolism in Two Managed Shallow Lakes with Different Salinity and Trophic Conditions: The Sauce Grande and La Salada Lakes (Argentina). *Water*, 10(9): 1136.

Brown, C. J., Saunders, M. I., Possingham, H. P., y Richardson, A. J. 2013. Managing for interactions between local and global stressors of ecosystems. *Plos one*, 8(6): 65765.

Carpenter, S. R., Stanley, E. H., y Vander Zanden, M. J. 2011. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. *Annual review of Environment and Resources*, 36: 75-99.

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.

Diovisalvi, N., Bohn, V. Y., Piccolo, M. C., Perillo, G. M., Baigún, C., y Zagarese, H. E. 2015. Shallow lakes from the Central Plains of Argentina: an overview and worldwide comparative analysis of their basic limnological features. *Hydrobiologia*, 752(1): 5-20.

Dukatz, F., Ferrati, R., y Canziani, G. 2006. Clasificación de lagos someros pampeanos mediante imágenes Landsat TM. *Biología Acuática*, 22: 95-101.

Fischer, E. M., y Knutti, R. 2015. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 5(6): 560.

Forneron, C. F. 2016. Hidrografía de la laguna Sauce Grande (provincia de Buenos Aires) en época de sequía. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur.

Hammer, U. T., 1986. *Saline Lake Ecosystems of the World*. Dr W. Junk Publishers, Dordrecht.

Hipsey, M. R., Bruce, L. C., Boon, C., Busch, B., Carey, C. C., Hamilton, D. P., y Winslow, L. A. 2019. A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Geosci. Model Dev.*, 12: 473-523.

Jennings, E., Jones, S., Arvola, L., Staehr, P. A., Gaiser, E., Jones, I. D., y De Eyto, E. 2012. Effects of weather-related episodic events in lakes: an analysis based on high-frequency data. *Freshwater Biology*, 57(3): 589-601.

Jones, S. E., Chiu, C. Y., Kratz, T. K., Wu, J. T., Shade, A., y McMahon, K. D. 2008. Typhoons initiate predictable change in aquatic bacterial communities. *Limnology and Oceanography*, 53(4): 1319-1326.

Klug, J. L., Richardson, D. C., Ewing, H. A., Hargreaves, B. R., Samal, N. R., Vachon, D., y Weathers, K. C. 2012. Ecosystem effects of a tropical cyclone on a network of lakes in northeastern North America. *Environmental science y technology*, 46(21): 11693-11701.

Lagomarsino, L., Diovisalvi, N., Bustingorry, J., Escaray, R., y Zagarese, H. E. 2015. Diel patterns of total suspended solids, turbidity, and water transparency in a highly turbid, shallow lake (Laguna Chascomús, Argentina). *Hydrobiologia*, 752(1): 21-31.

Marcé, R., George, G., Buscarinu, P., Deidda, M., Dunalska, J., de Eyto, E., y Moreno-Ostos, E. 2016. Automatic high frequency monitoring for improved lake and reservoir management. *Environmental science y technology*, 50(20): 10780-10794.

Meinson, P., Idrizaj, A., Nöges, P., Nöges, T., y Laas, A. 2015. Continuous and high-frequency measurements in limnology: history, applications, and future challenges. *Environmental Reviews*, 24(1): 52-62.

Porter, J. H., Nagy, E., Kratz, T. K., Hanson, P., Collins, S. L., y Arzberger, P. 2009. New eyes on the world: advanced sensors for ecology. *BioScience*, 59(5): 385-397.

Read, J. S., Hamilton, D. P., Desai, A. R., Rose, K. C., MacIntyre, S., Lenters, J. D., y Rusak, J. A. 2012. Lake-size dependency of wind shear and convection as controls on gas exchange. *Geophysical Research Letters*, 39(9): 1-5.

Staehr, P. A., Bade, D., Van de Bogert, M. C., Koch, G. R., Williamson, C., Hanson, P., y Kratz, T. 2010. Lake metabolism and the diel oxygen technique: state of the science. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8(11): 628-644.

Torremorell, A., Llames, M. E., Perez, G. L., Escaray, R., Bustingorry, J., y Zagarese, H. 2009. Annual patterns of phytoplankton density and primary pro-

duction in a large, shallow lake: the central role of light. *Freshwater Biology*, 54(3): 437-449.

Tsai, J. W., Kratz, T. K., Rusak, J. A., Shih, W. Y., Liu, W. C., Tang, S. L., y Chiu, C. Y. 2016. Absence of winter and spring monsoon changes water level and rapidly shifts metabolism in a subtropical lake. *Inland Waters*, 6(3): 436-448.

Van de Bogert, M. C., Bade, D. L., Carpenter, S. R., Cole, J. J., Pace, M. L., Hanson, P. C., y Langman, O. C. 2012. Spatial heterogeneity strongly affects estimates of ecosystem metabolism in two north temperate lakes. *Limnology and Oceanography*, 57(6): 1689-1700.

Vitale, A. J., Perillo, G. M., Genchi, S. A., Arias, A. H., y Piccolo, M. C. 2018. Low-cost monitoring buoys network tracking biogeochemical changes in lakes and marine environments—a regional case study. *Pure and Applied Chemistry*, 90(10): 1631-1646.

Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., y Tilman, D. G. 1997. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological applications*, 7(3): 737-750.

Williamson, C. E., Brentrup, J. A., Zhang, J., Renwick, W. H., Hargreaves, B. R., Knoll, L. B., y Rose, K. C. 2014. Lakes as sensors in the landscape: optical metrics as scalable sentinel responses to climate change. *Limnology and Oceanography*, 59(3): 840-850.

Williamson, C. E., Saros, J. E., Vincent, W. F., y Smol, J. P. 2009. Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6 part 2): 2273-2282.

Winslow, L. A., Zwart, J. A., Batt, R. D., Dugan, H. A., Woolway, R. I., Corman, J. R., y Read, J. S. 2016. Lake Metabolizer: an R package for estimating lake metabolism from free-water oxygen using diverse statistical models. *Inland Waters*, 6(4): 622-636.

Woolway, R. I., Jones, I. D., Hamilton, D. P., Maberly, S. C., Muraoka, K., Read, J. S., y Winslow, L. A. 2015. Automated calculation of surface energy fluxes with high-frequency lake buoy data. *Environmental Modelling y Software*, 70: 191-198.

Woolway, R. I., Verburg, P., Lenters, J. D., Merchant, C. J., Hamilton, D. P., Brookes, J., y Laas, A. 2018. Geographic and temporal variations in turbulent heat loss from lakes: A global analysis across 45 lakes. *Limnology and Oceanography*, 63(6): 2436-2449.

Wüest, A., y Lorke, A. 2003. Small-scale hydrodynamics in lakes. *Annual Review of fluid mechanics*, 35(1): 373-412.