

# Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación Sierra de Guadarrama

## Evolución del Estado Hidrológico y Ecológico de la Laguna Grande de Peñalara. Año 2021.

### INFORME



Año 2022

**CONSEJERIA DE MEDIOAMBIENTE, VIVIENDA Y AGRICULTURA**  
DIRECCION GENERAL DE BIODIVERSIDAD Y RECURSOS NATURALES

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN, SEGUIMIENTO Y EVALUACION**  
PARQUE NACIONAL DE LA SIERRA DE GUADARRAMA

*Evolución del Estado Hidrológico y Ecológico de la Laguna Grande de Peñalara. Año 2021*

**Autor principal**

**Ignacio Granados.** CISE

**Equipo de trabajo o colaboradores**

**Ángel Rubio.** CISE

**Coordinación**

**Juan A. Vielva Juez.** Responsable del Centro de Investigación (CISE)

# Evolución del Estado Hidrológico y Ecológico de la Laguna Grande de Peñalara - 2021

v1\_abril 2022

## Índice

PREFACIO.....	6
1. Resumen ejecutivo – Estado hidrológico y ecológico en 2021 .....	7
2. Antecedentes y justificación .....	10
3. Meteorología.....	13
3.1. Serie histórica .....	13
3.2. Meteorología 2021 .....	16
3.3. Indicadores climáticos.....	18
4. Físico-química.....	21
4.1. Espesor de nieve .....	21
4.2. Cubierta de hielo.....	22
4.3. Nivel del agua. Tasa de renovación.....	26
4.4. Temperatura del agua. Estabilidad de la Columna de agua.....	31
4.5. Transparencia.....	36
4.6. Oxígeno disuelto .....	39
4.7. pH.....	44
4.8. Conductividad .....	46
4.9. Alcalinidad, calcio y magnesio .....	48
4.10. Sílice .....	53
4.11. Nutrientes .....	54
4.12. Pigmentos fotosintéticos .....	58
4.13. Estado trófico y tendencia .....	60
5. Biota .....	63
5.1. Fitoplancton .....	63
5.2. Macroinvertebrados bentónicos .....	63
5.3. Macrófitos.....	64
6. Trampas de sedimento.....	65
7. Estado ecológico.....	66
8. Bibliografía .....	68
ANEXO - Análisis de la aplicación del índice IBCAEL al caso concreto de los Humedales del Macizo de Peñalara.....	70

## Figuras

Figura 1. Temperatura atmosférica media mensual durante todo el periodo del seguimiento limnológico mensual (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).....	13
Figura 2. Precipitación mensual durante todo el periodo del seguimiento limnológico mensual (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).....	14
Figura 3. Estimación de la tendencia de la temperatura media anual 1946-2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada). ....	15
Figura 4. Estimación de la tendencia de la precipitación anual 1946-2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada). ....	16
Figura 5. Temperatura media diaria atmosférica durante 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada). ....	16
Figura 6. Precipitación diaria durante 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada). ....	17
Figura 7. Horas de Sol diarias durante 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).....	17
Figura 8. Sistema de indicadores - Temperatura media anual (Estación AEMET del puerto de Navacerrada). ....	18
Figura 9. Sistema de indicadores - Temperatura media mensual 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada). ....	19
Figura 10. Sistema de indicadores - Precipitación anual (Estación AEMET del puerto de Navacerrada). ....	19
Figura 11. Sistema de indicadores – Precipitación mensual 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).....	20
Figura 12. Espesor medio diario del manto nival en el invierno 2020/2021 en el Puerto de Cotos.....	21
Figura 13. Sistema de indicadores - Espesor medio del manto nival de la temporada invernal en el Puerto de Cotos .....	22
Figura 14. Sistema de indicadores - Duración de la cubierta de hielo en la Laguna de Peñalara.....	23
Figura 15. Sistema de indicadores - Fecha de formación de la cubierta de hielo en la Laguna de Peñalara.....	23
Figura 16. Correlación entre la duración de la cubierta de hielo y a) la fecha de formación del hielo; y b) la fecha de deshielo. D1E = Días desde el 1 de enero. ....	24
Figura 17. Estimación de la tendencia del número de días con hielo en la laguna. Se ha eliminado el año 2018 porque la duración de la cubierta estuvo muy influenciada por un alud de nieve que cayó sobre la laguna. ....	24
Figura 18. Espesor de la cubierta de hielo en la Laguna de Peñalara durante todo el periodo del seguimiento limnológico mensual.....	25
Figura 19. Correlación entre el espesor máximo y la duración de la cubierta de hielo.....	25
Figura 20. Nivel del agua diario en la Laguna de Peñalara (1998-2021), conforme al registro manual diario del limnómetro de la laguna .....	26
Figura 21. Media diaria del nivel del agua en la Laguna de Peñalara entre 2016 - 2021, a partir de los datos de sensor automático de medida del nivel. ....	27
Figura 22. Rango y media diaria del nivel del agua en la Laguna de Peñalara durante 2021, a partir de los datos de sensor automático de medida del nivel.....	27
Figura 23. Variación del nivel del agua en la Laguna de Peñalara durante 2021 en comparación con el año tipo de la serie 1998-2020 (rango del percentil 10%-90%, promedio y nivel máximo). Los datos provisionales provienen del registro manual por parte de la vigilancia del parque (línea punteada) .....	28

Figura 24. Porcentaje de renovación en la Laguna de Peñalara, calculado como la media móvil de 7 días para el período 1998-2021. ....	29
Figura 25. Histograma de los porcentaje de renovación diarios en la Laguna de Peñalara, calculados como la media móvil de 7 días para el período 1998-2021. ....	30
Figura 26. Variación del porcentaje de renovación en la Laguna de Peñalara durante 2021 en comparación con el año tipo de la serie 1998-2021 (rango del percentil 10%-90%, promedio y nivel máximo). Los datos provisionales provienen del registro manual por parte de la vigilancia del parque (línea punteada).....	30
Figura 27. Temperatura media diaria del agua en la Laguna de Peñalara. ....	31
Figura 28. Temperatura media acuática diaria durante 2021 en la Laguna de Peñalara. ....	32
Figura 29. Sistema de indicadores - Temperatura media del agua superficial del mes más cálido en la Laguna de Peñalara.....	33
Figura 30. Contenido de calor de la columna de agua en la Laguna de Peñalara para la serie histórica 2005-2021. ...	33
Figura 31. Índice de estabilidad de Schmidt en la Laguna de Peñalara para la serie histórica 2005-2021.....	35
Figura 32. Índice de estabilidad de Schmidt en la Laguna de Peñalara, detalle de 2021. ....	35
Figura 33. A) Índice de estabilidad de Schmidt máximo (S.max) anual en la Laguna de Peñalara. B) Mes del año en el que se produce el máximo anual del índice de estabilidad de Schmidt. ....	36
Figura 34. Profundidad de la visibilidad del disco de Secchi durante los muestreos realizados en 2021. ....	37
Figura 35. Profundidad de la visibilidad del disco de Secchi mínima anual 1995-2021 .....	37
Figura 36. Radiación transmitida bajo la cubierta de hielo (modelización) durante el período 1996-2021.....	38
Figura 37. Iluminación subacuática máxima diaria a dos profundidades durante 2020-2021 (hasta el 10 de octubre) en la Laguna de Peñalara. La serie de 1m está bastante incompleta como consecuencia de los problemas que ha tenido el sensor durante 2021 (bandas rosas).....	39
Figura 38. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1997-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	40
Figura 39. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en la columna de agua de la laguna de Peñalara durante el año hidrológico 2021. Medidas discretas durante los muestreos. ....	41
Figura 40. Porcentaje medio diario de saturación de oxígeno disuelto en el fondo de la laguna de Peñalara durante el año hidrológico 2021. Medida en continuo con registrador automático de datos.....	42
Figura 41. A) Detalle del proceso de consumo del oxígeno disuelto en el fondo de la laguna debajo de la cubierta de hielo. B) Detalle de la oscilación diaria de oxígeno disuelto en el fondo de la laguna durante el período central de verano.....	43
Figura 42. pH medio y mínimo anual en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos. ....	44
Figura 43. Colector de depósito atmosférico húmedo y seco instalado el puerto de Los Cotos.....	45
Figura 44. pH en superficie de la laguna de Peñalara durante 2021. Medidas discretas durante los muestreos.....	45
Figura 45. Conductividad en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1997-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	46
Figura 46. Conductividad en la columna de agua de la laguna de Peñalara durante el año hidrológico 2021. Medidas discretas durante los muestreos.....	47

Figura 47. Conductividad media y máxima anual en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	47
Figura 48. Conductividad en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021. Medidas discretas durante los muestreos. ....	48
Figura 49. Alcalinidad media y máxima anual en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	49
Figura 50. Alcalinidad en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.....	50
Figura 51. Concentración media y máxima anual de calcio en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	51
Figura 52. Concentración media y máxima anual de calcio en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	51
Figura 53. Calcio en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.....	52
Figura 54. Magnesio en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.....	52
Figura 55. Concentración media y máxima anual de sílice en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 2001-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	53
Figura 56. Sílice en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021. ....	53
Figura 57. Concentración media y máxima anual de nitrato en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1996-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	55
Figura 58. Concentración media y máxima anual de amonio en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1996-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	55
Figura 59. Nitrato en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021. ....	56
Figura 60. Amonio en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.....	56
Figura 61. Concentración media y máxima anual de fósforo total en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	57
Figura 62. Fósforo total en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.....	58
Figura 63. Concentración media y máxima anual de clorofila <i>a</i> en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.....	59
Figura 64. Clorofila <i>a</i> en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021. ....	59
Figura 65. Evolución anual del estado trófico de la laguna de Peñalara, con a) el TSI (Carlson, 1977) y b) la clasificación de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 1982). Se indican los límites entre las clases de estado trófico con línea punteada. El sombreado verde indica condiciones oligotróficas, el blanco indica condiciones mesotróficas y el rosado condiciones eutróficas para cada una de las variables.....	61
Figura 66. A) Estimación de la tendencia del máximo estival de fósforo total y B) de clorofila <i>a</i> 1996-2021.....	62
Figura 67. Acumulación anual de sedimento en la laguna de Peñalara entre 1997 y 2021. ....	65
Figura 68. Sistema de Indicadores - Estado de conservación de la Laguna Grande de Peñalara, .....	67

## PREFACIO

Desde aquellas fábulas que corrían, entre los campesinos serranos, sobre la laguna de Peñalara que la consideraban encantada, que escapa y huye desapareciendo del que la busca, que brama durante las tormentas como si en ella hubiera monstruos, que allí cargan las nubes de sapos y que era insondable hasta el punto de comunicar con el mar, al conocimiento que se tiene a día de hoy de esta laguna ha pasado mucho tiempo.

Desde finales del siglo XIX y principios del XX fueron muchos los naturalistas, nacionales y europeos, que iniciaron el descubrimiento y la interpretación de esta laguna, que junto con otras del macizo, constituyen un complejo lacustre único en la Sierra de Guadarrama. Con origen en el periodo Tardiglaciario, entre el Pleistoceno y principios del Holoceno.

Pero, sin duda, fue la Comunidad de Madrid, a través del Parque Natural de Peñalara la que, consciente del deterioro que se apreciaba en la misma, inicia en 1992 un intensivo seguimiento y diagnóstico de la laguna de Peñalara, novedoso en España al incluir el estudio paleolimnológico, seguimiento que se ha prolongado hasta la actualidad, ya en el Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama.

Es por ello el que, la Laguna de Peñalara y su cortejo lagunar, declarados Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR), son probablemente el complejo lagunar más seguido y diagnosticado de España. De ello dan cuenta, tanto los informes anuales, como el que ahora se presenta, como el libro, publicado por la Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad de Madrid, en el 2006 del que son sus autores quienes suscriben también este informe.

Finalmente quiero destacar la importancia del mantenimiento en el tiempo de estos seguimientos, como ha venido haciendo la Comunidad de Madrid lo que es, sin ninguna duda, un ejemplo de compromiso en la conservación.

JUAN VIELVA JUEZ  
RESPONSABLE DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN.



## 1. Resumen ejecutivo – Estado hidrológico y ecológico en 2021

En primer lugar, es necesario establecer un contexto climático para el año 2021, ya que las condiciones meteorológicas tienen una influencia fundamental sobre determinados aspectos de la hidrología y ecología de la laguna. El año 2021 **ha sido un año cálido en cuanto a temperatura** (7.7 °C de media anual, Figura 8). Solo noviembre de 2021 estuvo por claramente por debajo de la media mensual de la serie de referencia del trentenio climatológico 1981-2010. El resto de meses de 2021 estuvieron relativamente cerca de la media de la serie de referencia, destacando únicamente los meses de agosto, octubre y diciembre como anormalmente cálidos (Figura 9). En cuanto a la **precipitación**, el año 2021 puede considerarse **un año normal** (Figura 10), con una precipitación (1248 mm), caracterizado por un mes de febrero anormalmente húmedo seguido de un mes de marzo muy seco. También cabe señalar un final de verano (agosto-septiembre) relativamente anómalo por presentar mayores precipitaciones (Figura 11).

En cuanto al espesor de nieve, en el invierno 2020/2021 se observaron cuatro periodos con un manto nival en Cotos superior a los 10 cm (Figura 12). De los dos más importantes, el primero fue a principios de diciembre y provocó la formación de la cubierta de hielo de la laguna. El segundo episodio, desde el 25 de diciembre, fue el más largo con una duración de 34 días y al que contribuyó la borrasca Filomena. Sin embargo, esta borrasca que causó imponentes nevadas en la mayoría de la Comunidad de Madrid apenas supuso un incremento de 30 cm del manto nival en el Puerto de Los Cotos. De acuerdo con los datos históricos, **el espesor medio de nieve** (dic- mar) de la temporada 2020/2021 ha sido **normal** (Figura 13). La cubierta de hielo de la temporada 2020/2021 se prolongó durante 115 días entre el 6 de diciembre y el 31 de marzo. Esto supone una **cubierta de hielo normal** en el sistema de indicadores del parque nacional tanto en su duración (Figura 14) como en la fecha de formación (Figura 15). A largo plazo, no se ha encontrado una tendencia significativa en el número de días de la cubierta de hielo (Figura 17).

Respecto a la **hidrología**, durante el año 2021 destaca en primer lugar el mes de junio: en su primera mitad el nivel estuvo bastante por debajo de la media de la serie histórica (1998-2020), mientras que la segunda mitad estuvo muy por encima de esta media, llegando incluso a marcar un máximo histórico. En segundo lugar destaca claramente un período desde mediados de septiembre a mediados de octubre con un nivel del agua muy alto asociado a nuevos episodios de precipitación, incluyendo un período entre el 24 y el 27 de septiembre con un nivel del agua por encima del máximo registrado con anterioridad (Figura 23). La **oscilación media anual** del nivel del agua en 2021 han sido **36.4 cm** (frente a los 45 cm de la media histórica). El porcentaje medio de renovación del agua de la laguna en 2021 ha sido de 9.4% (**10.6 días de tiempo de residencia**). En 2021 destacan **6 episodios** (Figura 26) con un porcentaje diario de **renovación mayor del 50% (media del 74%)**, durante un total de 11 días. Así, desde el punto de vista hidrológico **2021 ha estado marcado por importantes avenidas de agua que han supuesto episodios concretos de muy alta renovación** de sus aguas.



En cuanto al estado ecológico, cabe mencionar que 2021 se caracterizó por una **temperatura normal del agua** (17.74 °C de media mensual del mes más cálido, Figura 29). En cierto modo viene a atenuar una tendencia observada en los últimos seis años, con cinco de ellos por encima de la media de la serie 2005-2021. No obstante, durante ese período se ha observado una tendencia al calentamiento de 0.61°C/década, aunque debido a la gran variabilidad interanual no es significativa. La máxima estabilidad de la columna de agua (**estabilidad de Schmidt**), a pesar de no alcanzarse temperaturas superficiales demasiado elevadas, ha sido una de las más altas registradas hasta el momento (Figura 31) y se postula que podría estar aumentando como consecuencia del cambio climático. La **transparencia** de la laguna **ha sido muy alta** durante todo el año, con un único mes en el que no se alcanzaba el fondo de la laguna (-3.75 m de visibilidad del disco de Secchi, Figura 34). Esto indica que la **zona fótica** (donde es posible la producción primaria) coincidiría prácticamente con **toda la columna de agua** en el período libre de hielo. Durante la época invernal 2020/2021, el espesor de la cubierta de hielo ha provocado que el **valor mínimo calculado de trasmisión de luz** a la columna de agua haya sido de 2.18 W/m<sup>2</sup>, un **valor relativamente elevado** (Figura 36).

En términos generales, la  **saturación de oxígeno en superficie oscila en torno al 100%** a lo largo del año, excepto en la capa de agua próxima al sedimento debajo de la cubierta de hielo y, en ocasiones, en la parte central de la época estival (Figura 38). Puntualmente se observan incrementos notables (más del 110%) como respuesta a un momento más productivo en la laguna. En 2021 se observó el descenso hasta alcanzar el **60% de saturación de oxígeno bajo la cubierta de hielo, aunque en un episodio de corta duración**. La instalación de sensores automáticos de registro de la concentración de oxígeno disuelto está permitiendo registrar sucesos y condiciones que no se llegan a detectar con una periodicidad mensual.

El **pH** de la laguna es ligeramente ácido, con un **valor medio para el agua superficial de 6.50** (Figura 42). Al igual que en más de dos tercios de los años estudiados, en 2021 el pH ha caído por debajo de pH 6.00, aunque por los valores estivales se considera que se trata de **episodios ácidos concretos** ligados a la entrada de iones ácidos procedentes de la fusión del manto nival durante la época de deshielo **y no un proceso de acidificación**.

Como viene siendo habitual, en 2021 también se caracterizó por **aguas muy poco mineralizadas** (máximo de 18 µS/cm, Figura 48) y **muy poco tamponadas** (alcalinidad 20-92 µeq/l, Figura 50). Por ello, la laguna es particularmente sensible a contaminantes ácidos. Los **niveles de nutrientes** (formas de nitrógeno y fósforo) son relativamente **bajos** (TIN < 85 µg/l, TP < 30 µg/l; Figura 59, Figura 60, Figura 62), constituyendo el depósito atmosférico y, más recientemente la combinación de ganado y cabra montés en la cuenca, la principal entrada de estos nutrientes. La **concentración de clorofila** en 2021 (Figura 64) ha sido bastante elevada bajo la cubierta de hielo (7.82 µg/l), aunque también ha sido **relativamente alta durante el periodo libre de hielo** (4.88 µg/l).

Tanto la transparencia como los niveles de pigmentos fotosintéticos coinciden en que la laguna de Peñalara es **generalmente oligotrófica, pero tendiendo ocasionalmente a las condiciones mesotróficas** (Figura 65). Se ha encontrado una **tendencia significativa al aumento del fósforo total y la clorofila a** (Figura 66) en los meses estivales de la serie 1995-2021, que podría estar **relacionada con el calentamiento global**.

En 2021 se han determinado **21 táxones de macroinvertebrados bentónicos**. Esta cifra está en el rango esperable de la comunidad de especies acuáticas tras la erradicación del salvelino (especie invasora).

La **tasa anual de acumulación de sedimento** se mantiene en **niveles bajos** (Figura 67) una vez revegetada la morrena que cierra la laguna y que a principios de los 90 estaba fuertemente erosionada por un uso público descontrolado.

Finalmente, evaluando conjuntamente los pigmentos fotosintéticos, el oxígeno disuelto, y los niveles de nutrientes, **se considera que el estado ecológico de la laguna Grande de Peñalara en 2021 es satisfactorio**, al igual que en los 13 años precedentes (Figura 68).

## 2. Antecedentes y justificación

La Laguna Grande de Peñalara es una laguna de origen glaciar ubicada en el macizo de Peñalara a 2019 m s.n.m. Es probablemente uno de los lugares más conocidos y visitados del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, una auténtica joya de la naturaleza madrileña.

El primer precedente en la conservación de este humedal es en 1930, mediante la Real Orden 213/1930, de 30 de septiembre, declarándose *Sitio Natural de interés Nacional*. En el año 1990, se declaró el *Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara*. En aquellos años se elaboró un informe de *Bases limnológicas para la gestión del sistema lagunar del Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara* (Toro y Montes, 1993). Este informe puso de manifiesto el estado de deterioro de la laguna: gran cantidad de basuras en su cubeta, eutrofización del agua, especies introducidas y una erosión grave de las inmediaciones de la laguna. Así, se inició un proyecto de restauración ecológica de la Laguna Grande de Peñalara. En concreto, las actuaciones realizadas por la Comunidad de Madrid para la restauración de la laguna y su entorno fueron las siguientes:

- Se erradicó, de modo pionero en España, el salvelino de la Laguna Grande de Peñalara. El salvelino es una especie de salmónido, cuya irresponsable introducción en esta laguna en la década de los 70 originó la desaparición de numerosas especies acuáticas presentes en la laguna.
- Se revirtió el proceso de eutrofización de la laguna Grande de Peñalara, es decir, el incremento desmesurado de nutrientes en el agua. Esto provocaba una pésima calidad del agua y ponía en peligro la persistencia de diversos organismos acuáticos muy sensibles a este tipo de contaminación.
- Se controló el proceso de erosión y compactación del suelo en los márgenes de la laguna Grande de Peñalara, originado por el pisoteo de los numerosos visitantes de este Espacio Natural. Para ello se procedió al acordonamiento de la zona más sensible, la instalación de pasarelas y a regenerar la vegetación.
- Se realizaron diversas campañas de limpieza tanto en la cubeta de la laguna como en su cuenca, evacuando gran multitud de residuos acumulados en el entorno.
- Se adoptaron las medidas necesarias para adecuar el uso turístico a la capacidad de carga del Circo de la Laguna y eliminar usos no compatibles como el baño y la acampada.
- Posteriormente, en 1998 se acometió un proceso de restauración sin precedentes en el mundo de la conservación: la desmantelación de una estación alpina de esquí (Valcotos), lo que ha contribuido sin duda a una mayor naturalización del entorno y a reducir la presión turística sobre la laguna.

Como complemento de las actuaciones de restauración, en julio de 1995 se inició un seguimiento limnológico mensual con el fin de establecer el grado de éxito de las medidas adoptadas y, en último término, conocer el funcionamiento y estado ecológico de esta laguna.

De esta manera se ha podido comprobar el éxito de la erradicación de una especie exótica invasora de la laguna, (el salvelino), donde hoy en día los primigenios habitantes de la Laguna han vuelto a colonizar sus aguas (4 especies de anfibios, y decenas de invertebrados acuáticos). Se ha podido observar como la tasa de sedimentación de la laguna, debido a una menor erosión, se ha recuperado. La calidad de las aguas ha vuelto a recuperar las condiciones de las aguas muy poco mineralizadas y generalmente oligotróficas de la Sierra de Guadarrama. En definitiva, la Laguna Grande de Peñalara ha recuperado en gran medida lo que durante muchos años fue sustraído por un intenso uso público.

Hoy en día la Laguna de Peñalara es un referente en la gestión y conservación, y de hecho en el año 2005 fue declarado el sitio Ramsar *Humedales del Macizo de Peñalara*, como reconocimiento a sus valores ecológicos de importancia internacional. El límite del sitio Ramsar coincide con los del humedal catalogado (Acuerdo de 2 de septiembre de 2004, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba la revisión del Catálogo de Embalses y Humedales de la Comunidad de Madrid).

Todo este proceso de evaluación de su estado ecológico, actuaciones de restauración y evolución a largo plazo se encuentra recogido en el libro *Laguna Grande de Peñalara: 10 años de seguimiento limnológico* (Granados et al., 2006). El presente informe supone una actualización hasta el año 2021 de la información contenida en dicho libro, por lo que no se repetirá aquí la descripción de muchos de los procesos ecológicos que se discuten con gran detalle en dicha publicación ni pretende entrar en detalle de la metodología empleada en el seguimiento limnológico.

El Plan Rector de Uso y Gestión (PRUG) del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama en el ámbito territorial de la Comunidad de Madrid (Comunidad de Madrid, 2020a), en su Capítulo VI, relativo al Programa de Seguimiento, Vigilancia y Control, establece en el Seguimiento de los procesos naturales y del estado ambiental, la *Hidrología y calidad de las aguas superficiales* como prioritario. Más aún, el listado de indicadores del estado de conservación del parque nacional (Artículo 107) incluye específicamente el indicador *Estado de conservación de la laguna de Peñalara*, así como varios indicadores relacionados con este para darle un contexto hidrometeorológico y de evaluación del efecto del cambio global. Además, el Plan de Humedales de la Comunidad de Madrid (Comunidad de Madrid, 2020b) establece como objetivo específico, el mantenimiento de los actuales trabajos de seguimiento limnológico del humedal, y en particular los de la Laguna Grande de Peñalara.

En un informe anterior del Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación del Parque Nacional (Granados, 2021) se establecía la situación de estado hidrológico y ecológico de la laguna Grande de Peñalara a fecha de aprobación del PRUG y del Plan de Humedales, planteando la perspectiva histórica (serie 1995-2020), como con mayor detalle los años 2019 y 2020. El presente informe viene a actualizar esa información para el año 2021, aunque hay que señalar que dada la cercanía en el tiempo algunos de los resultados aún no están disponibles o

estén pendientes de una validación final. Es el caso por ejemplo de algunas variables que se recogen con sensores automáticos subacuáticos que no podrán ser descargados y procesados hasta que finalice la época de cubierta de hielo del invierno 2021/2022.

### 3. Meteorología

#### 3.1. Serie histórica

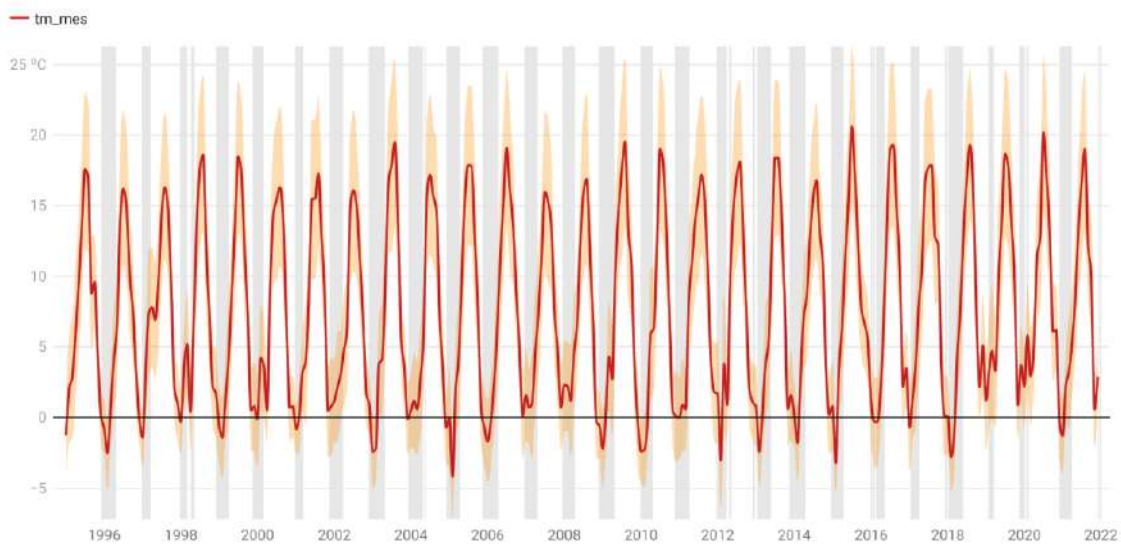
Las condiciones meteorológicas tienen una influencia fundamental sobre determinados aspectos de la ecología de la laguna. Determina por ejemplo la temperatura del agua, la estratificación de la columna de agua, la formación de la cubierta de hielo y el deshielo, la tasa de renovación, o la disponibilidad de luz en el medio subacuático.

El seguimiento limnológico mensual de la laguna se inició en julio de 1995, antes de que se desarrollase la red meteorológica del parque nacional. Por ello, se ha utilizado la cercana estación meteorológica del Puerto de Navacerrada (1894 m s.n.m., AEMET) para presentar la evolución histórica de la meteorología.

La Figura 1 muestra la temperatura atmosférica media mensual, mientras que la Figura 2 muestra la precipitación mensual durante el periodo del seguimiento limnológico.

#### Temperatura mensual ambiental

Estación Meteorológica del Puerto de Navacerrada - AEMET



La banda naranja indica el rango entre la media mensual de la temperatura mínima y la máxima. Las áreas grises indican los periodos con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación - Fuente: AEMET - Creado con Datawrapper

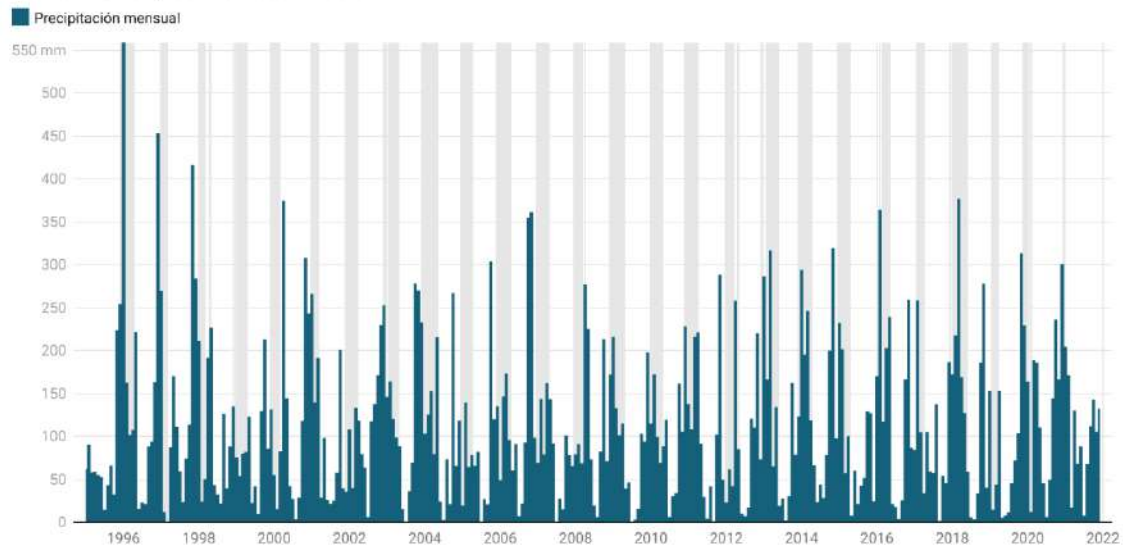
Figura 1. Temperatura atmosférica media mensual durante todo el periodo del seguimiento limnológico mensual (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

A lo largo de 1995-2021, la temperatura media mensual del mes más frío ha oscilado entre  $-4.2$  y  $0.9^{\circ}\text{C}$ , con un promedio de  $-1.3^{\circ}\text{C}$ . En cuanto al mes más cálido, la temperatura media mensual se ha situado entre  $16.0$  y  $20.6^{\circ}\text{C}$ , y un promedio de  $18.1^{\circ}\text{C}$ . En torno a 126 días la temperatura media se sitúa por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ , oscilando entre 88 y 157 según el año.



## Precipitación mensual

Estación Meteorológica del Puerto de Navacerra - AEMET



Las áreas grises indican los periodos con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: AEMET • Creado con Datawrapper

Figura 2. Precipitación mensual durante todo el periodo del seguimiento limnológico mensual (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

A lo largo del mismo periodo de 1995-2021, la precipitación del mes más húmedo ha oscilado entre 162 y 559 mm, con un promedio de 292 mm. En términos promedio, hay unos 75 días al año en el que se produce lluvia y unos 71 días en los que nieva. En este último caso, es muy probable que en la ubicación concreta de la laguna las nevadas sean más frecuentes por su mayor altitud.

El porcentaje medio mensual de la insolación diaria frente a la insolación teórica está en torno al 49.4%, con un rango entre el 28.0 y el 58.4%. La velocidad media mensual del viento se sitúa entre 10.1 y 15.0 km/h.

El análisis a largo plazo (1945-2021) de la estación meteorológica del Puerto de Navacerrada ofrece una indudable constatación del proceso de cambio climático global. Concretamente, la temperatura media anual muestra una tendencia significativa al calentamiento [MAKESENS  $Z > 0.001$ ; (Salmi et al., 2002)].

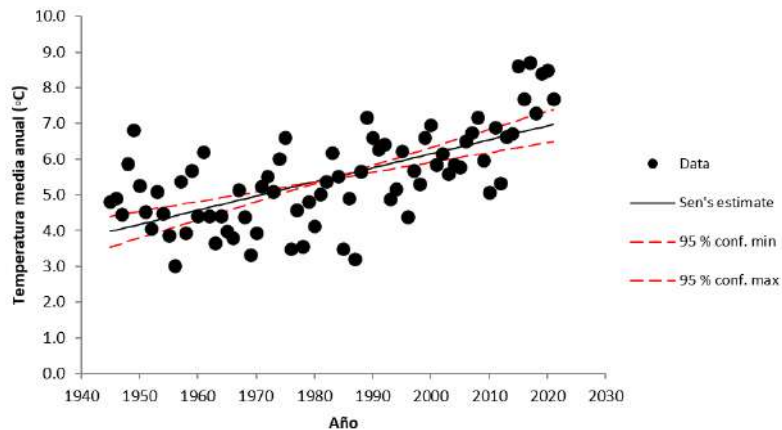


Figura 3. Estimación de la tendencia de la temperatura media anual 1946-2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

Esta tendencia al calentamiento es altamente significativa ( $p < 0.01$ ) en todos los meses y estaciones, aunque algo menos para la primavera ( $p < 0.05$ ) dado que los meses de mayo y junio son los únicos que no presentan una tendencia significativa (Tabla 1).

Tabla 1. Tendencias en la temperatura media mensual, estacional y anual en el Puerto de Navacerrada (1945-2020). Probabilidad: +  $P < 0.1$ , \*  $P < 0.05$ , \*\*  $< 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ .

	Tendencia Mann-Kendall			Estimación Sen de la pendiente				
	Test Z	Signific.	Q	Qmin95	Qmax95	B	Bmin95	Bmax95
<b>Enero</b>	3.66	***	0.073	0.034	0.116	-7.07	-5.54	-8.86
<b>Febrero</b>	3.04	**	0.077	0.031	0.127	-8.26	-6.42	-10.15
<b>Marzo</b>	4.20	***	0.072	0.038	0.103	-4.26	-3.02	-5.88
<b>Abril</b>	2.56	*	0.026	0.006	0.044	3.77	4.70	3.11
<b>Mayo</b>	1.34		0.011	-0.007	0.030	10.34	11.17	9.72
<b>Junio</b>	-0.70		-0.005	-0.022	0.011	14.93	15.60	14.18
<b>Julio</b>	3.29	**	0.030	0.013	0.047	16.08	16.63	15.45
<b>Agosto</b>	3.90	***	0.031	0.017	0.044	14.68	15.27	14.18
<b>Septiembre</b>	2.99	**	0.028	0.010	0.044	9.92	10.62	9.27
<b>Octubre</b>	3.15	**	0.031	0.012	0.050	4.82	5.46	4.10
<b>Noviembre</b>	3.20	**	0.033	0.013	0.054	-0.59	0.02	-1.04
<b>Diciembre</b>	2.84	**	0.056	0.020	0.092	-4.41	-3.34	-6.18
<b>ANUAL</b>	5.79	***	0.039	0.028	0.051	3.98	4.39	3.54
<b>Primavera</b>	2.03	*	0.013	0.000	0.024	9.73	10.20	9.40
<b>Verano</b>	4.17	***	0.031	0.017	0.042	13.60	14.31	13.17
<b>Otoño</b>	3.47	***	0.039	0.017	0.056	-0.33	0.58	-0.95
<b>Invierno</b>	4.37	***	0.075	0.043	0.107	-7.17	-6.30	-8.36

Sin embargo, no se ha observado ninguna tendencia significativa en la precipitación, ni a escala anual (Figura 4) ni mensual.

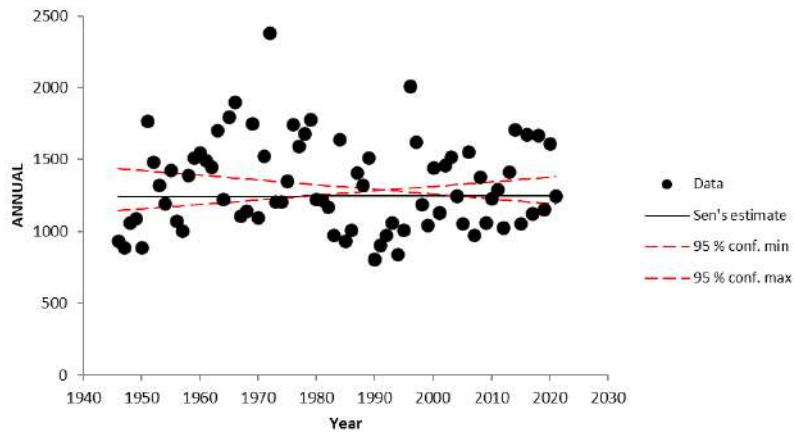


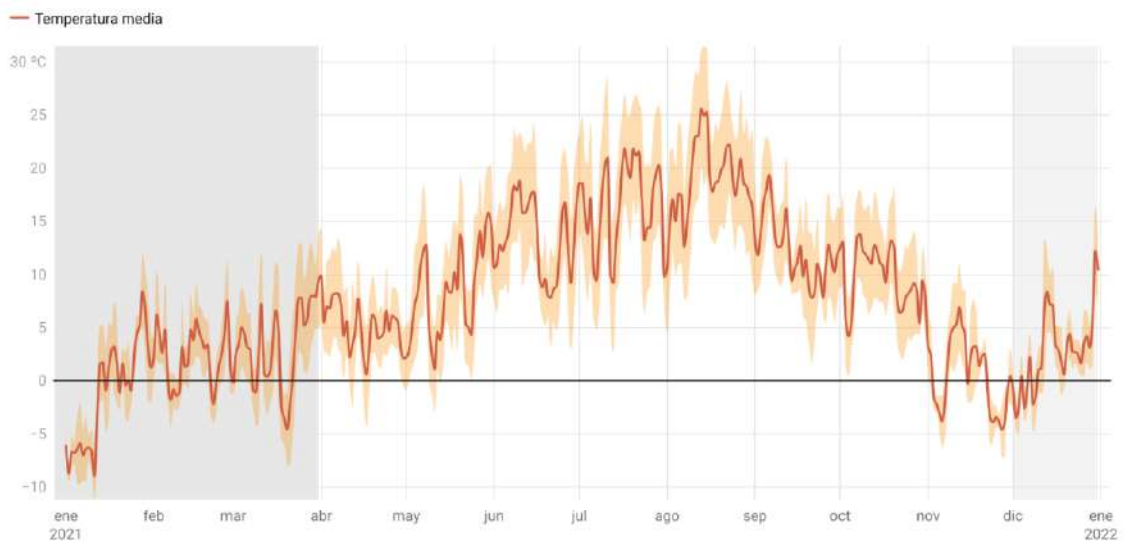
Figura 4. Estimación de la tendencia de la precipitación anual 1946-2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

### 3.2. Meteorología 2021

Respecto al 2021, la Figura 5 muestra la temperatura media diaria (y el rango de variación) a lo largo del año.

#### Temperatura ambiental 2021

Estación Meteorológica del Puerto de Navacerra - AEMET



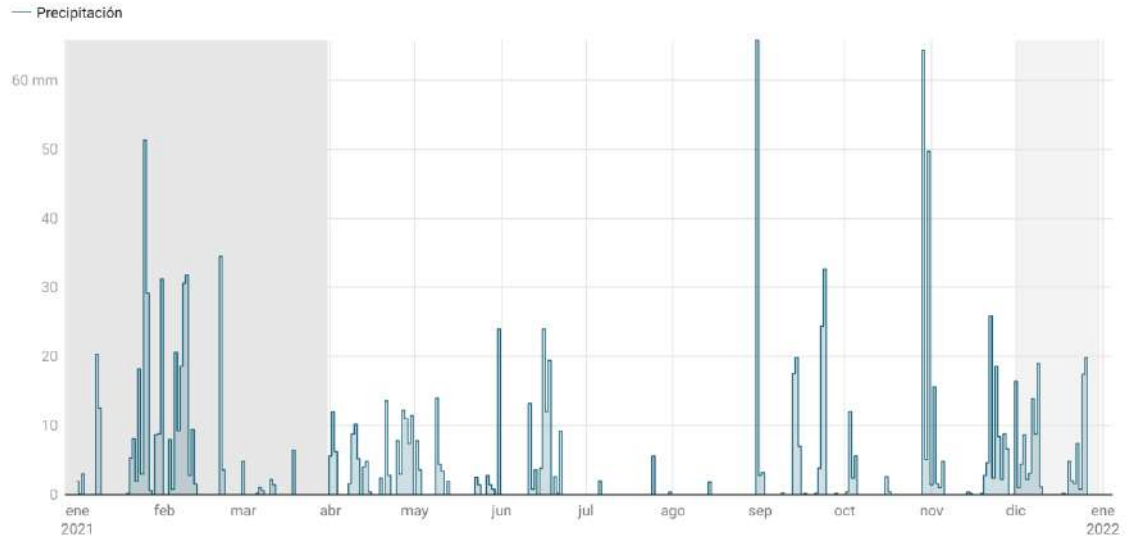
La banda naranja indica el rango diario de temperatura. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.  
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación - Fuente: AEMET - Creado con Datawrapper

Figura 5. Temperatura media diaria atmosférica durante 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

La Figura 6 muestra la precipitación diaria a lo largo de 2021.

## Precipitación 2021

Estación Meteorológica del Puerto de Navacerra - AEMET



Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

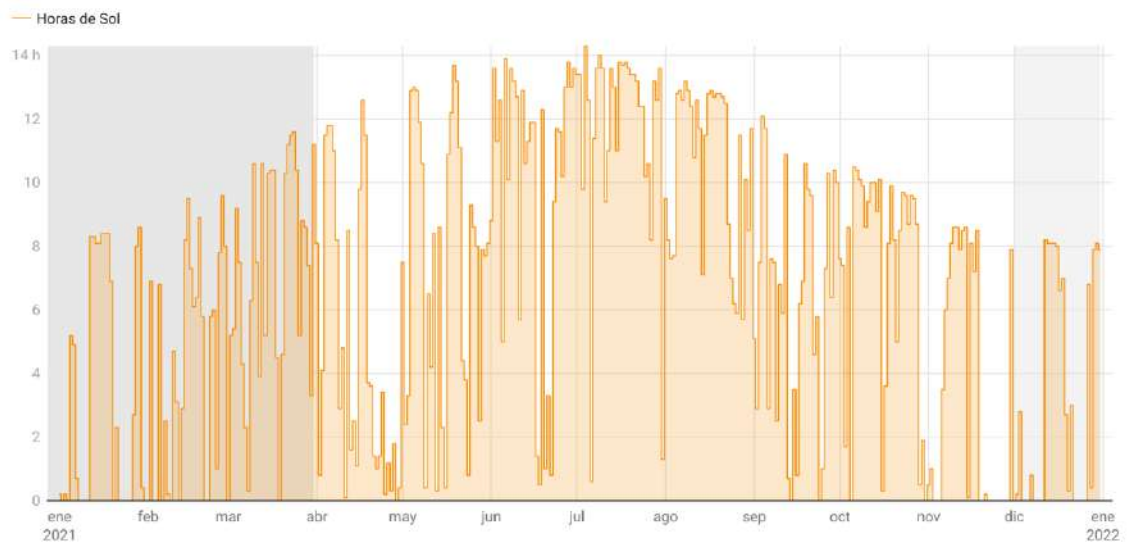
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: AEMET • Creado con Datawrapper

Figura 6. Precipitación diaria durante 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

Finalmente, la Figura 7 muestra las horas de Sol diarias a lo largo del 2021.

## Horas de Sol 2021

Estación Meteorológica del Puerto de Navacerra - AEMET



Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: AEMET • Creado con Datawrapper

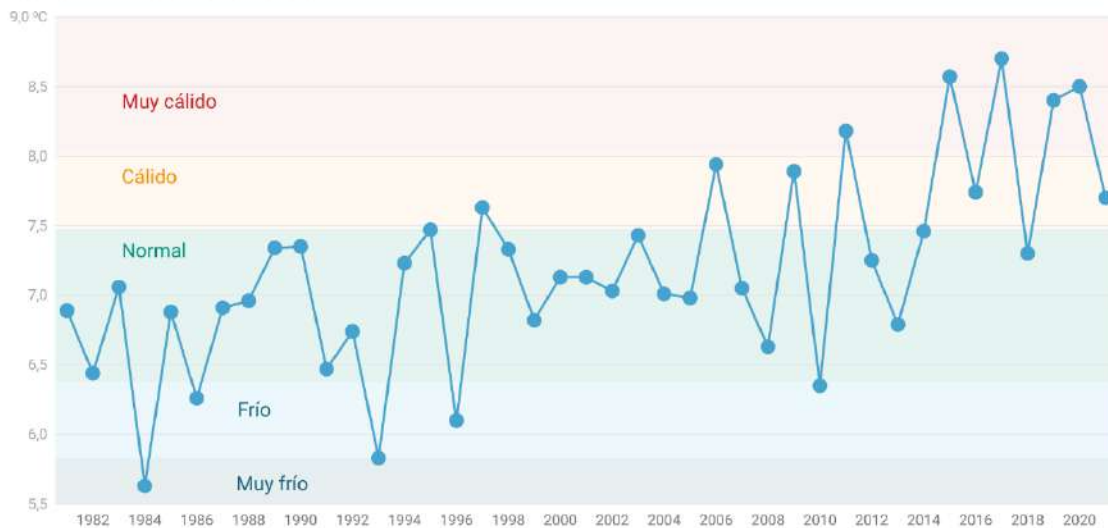
Figura 7. Horas de Sol diarias durante 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

### 3.3. Indicadores climáticos

El parque nacional cuenta con un sistema de indicadores del estado ecológico, algunos de ellos directamente relacionados con variables meteorológicas o de cambio global. En particular, 2021 se clasifica como un año *cálido* tomando como referencia el trentenio climatológico 1981-2010 (Figura 8). Esta clasificación se basa en umbrales para considerar un año dentro de la normalidad, como anómalo ( $\pm 1\sigma$ ,  $\approx 68\%$ ), o extraordinariamente anómalo ( $\pm 2\sigma$ ,  $\approx 95\%$ ). Por ejemplo, comparando con la distribución de temperaturas del trentenio climatológico 1981-2010 sólo en torno al 2.5% de los años serían clasificados como muy cálidos y sólo un tercio sería considerado fuera de la normalidad bien sea por ser más cálidos o fríos de lo normal.

#### Temperatura media anual

Estación AEMET Puerto de Navacerrada.



La temperatura media anual del último trentenio climatológico de referencia (1981-2010) es de 6.9°C. Con este trentenio se han establecido umbrales para considerar un año dentro de la normalidad, como anómalo ( $\pm 1\sigma$ ,  $\approx 68\%$ ), o extraordinariamente anómalo ( $\pm 2\sigma$ ,  $\approx 95\%$ ).

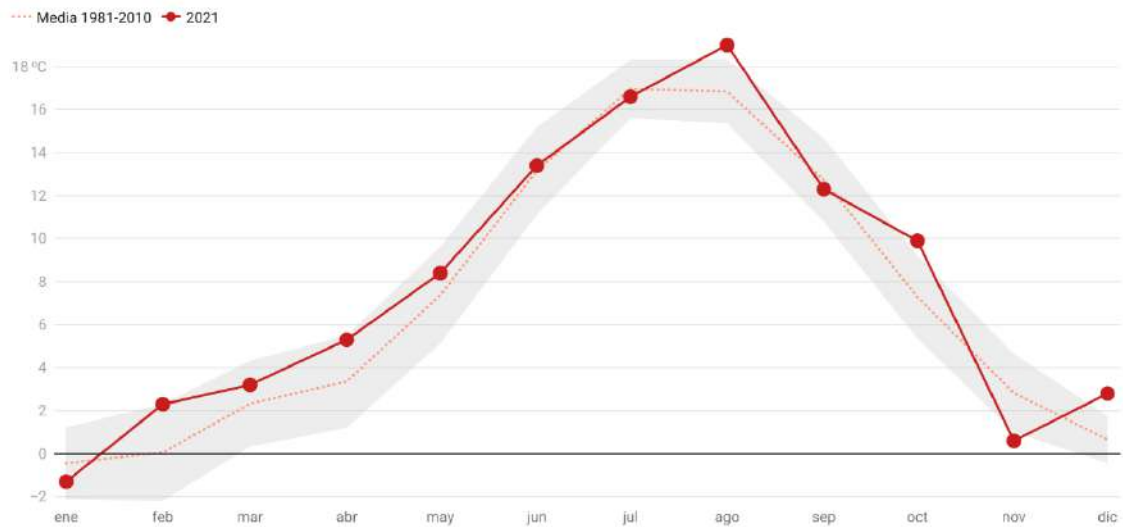
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: AEMET · Creado con Datawrapper

Figura 8. Sistema de indicadores - Temperatura media anual (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

A escala intraanual, solo noviembre de 2021 estuvo claramente por debajo de la media mensual de la serie de referencia del trentenio climatológico 1981-2010 (Figura 9). El resto de meses de 2021 estuvieron relativamente cerca de la media de la serie de referencia, destacando únicamente los meses de agosto, octubre y diciembre como anormalmente cálidos. Las fluctuaciones observadas no permiten señalar alguna estación del año particularmente llamativa por sus temperaturas.

## Temperatura media mensual 2021

Estación AEMET Puerto de Navacerrada



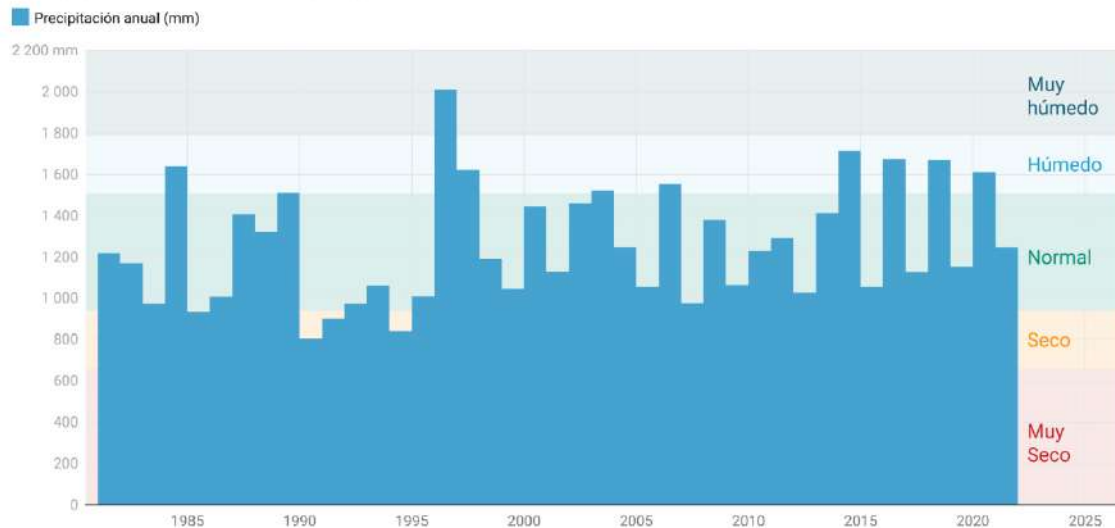
La temperatura media mensual durante el último trentenio climatológico de referencia (1981-2010) se indica con la línea punteada. La banda gris indica si determinado mes del último año evaluado puede considerarse dentro de la normalidad, o anómalo ( $\pm 1\sigma$ , =68%).  
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: AEMET · Creado con Datawrapper

Figura 9. Sistema de indicadores - Temperatura media mensual 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

Respecto a la precipitación, 2021 se clasificó en el sistema de indicadores del parque nacional como un *año normal* (Figura 10).

## Precipitación anual

Estación de AEMET del Puerto de Navacerrada.



La precipitación media anual del último trentenio climatológico de referencia (1981-2010) es de 1223 mm. Con este trentenio se han establecido umbrales para considerar un año dentro de la normalidad, como anómalo ( $\pm 1\sigma$ , =68%), o extraordinariamente anómalo ( $\pm 2\sigma$ , =95%).  
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: AEMET · Creado con Datawrapper

Figura 10. Sistema de indicadores - Precipitación anual (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

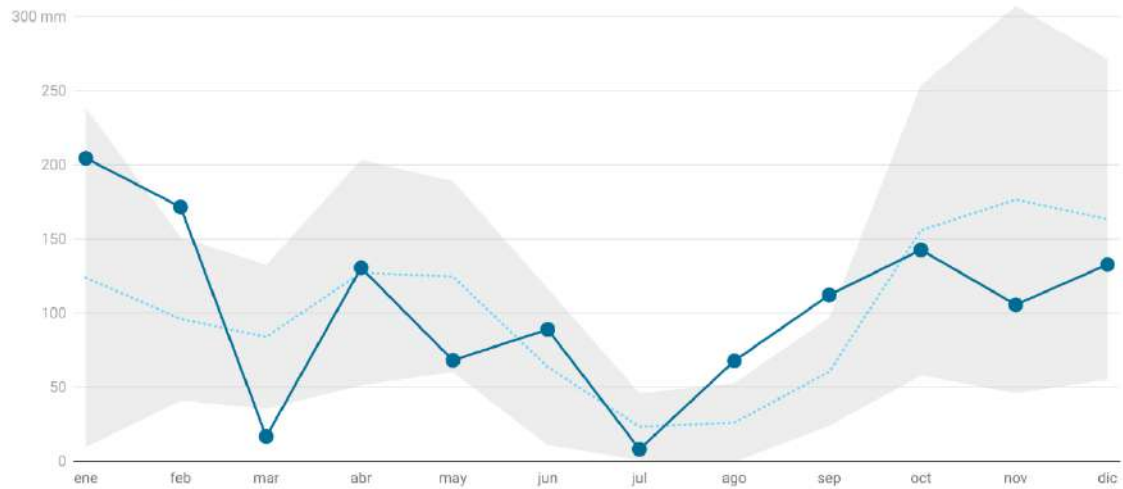


En 2021 no hay un patrón estacional claro (Figura 11), pero sí destaca un mes de febrero anormalmente húmedo seguido de un mes de marzo muy seco. También cabe señalar un final de verano (agosto-septiembre) relativamente anómalo por presentar mayores precipitaciones.

### Precipitación media mensual 2021

Estación AEMET Puerto de Navacerrada

Media 1981-2010 2021



La precipitación media mensual durante el último trentenio climático de referencia (1981-2010) se indica con la línea punteada. La banda gris indica si determinado mes del último año evaluado puede considerarse dentro de la normalidad, o anómalo ( $\pm 1\sigma$ , =68%)  
 Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: AEMET · Creado con Datawrapper

Figura 11. Sistema de indicadores – Precipitación mensual 2021 (Estación AEMET del puerto de Navacerrada).

## 4. Físico-química

### 4.1. Espesor de nieve

La Figura 12 muestra el espesor de nieve diario durante el invierno 2020/2021 en la estación meteorológica del puerto de Los Cotos (PNSG, 2021). En ese invierno se observaron cuatro periodos con un manto nival en Cotos superior a los 10 cm. El primero de estos episodios a principios de diciembre fue suficiente para provocar la formación de la cubierta de hielo de la laguna. El segundo episodio, desde el 25 de diciembre, fue el más largo con una duración de 34 días y al que contribuyó la borrasca Filomena. Sin embargo, esta borrasca que causó imponentes nevadas en la mayoría de la Comunidad de Madrid apenas supuso un incremento de 30 cm del manto nival en el Puerto de Los Cotos.

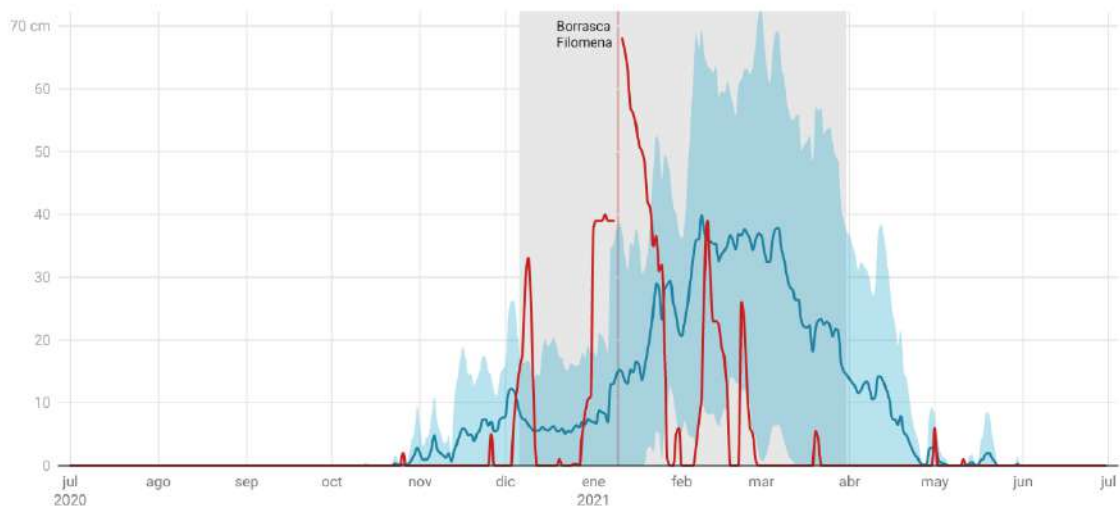
Tras este período más largo, se suceden otros dos más cortos y de menor espesor del manto nival (6 al 17 y 22 al 27 de febrero). A partir de entonces solo se observarán pequeñas nevadas esporádicas en Cotos. Nuevamente, se observa un deshielo prematuro después de cada nueva nevada, observándose una discontinuidad de la cubierta de nieve que cada año es más efímera.

Lógicamente en el circo de la laguna la duración (y espesor) de la nieve es mayor que en el Puerto de Cotos por su mayor altitud, aunque no se dispone para el año 2021 de esta información.

#### Espesor de la nieve en Cotos. Invierno 2020/2021

Estación Meteorológica de la RMPNSG

— Nieve 2020-2021 — Nieve promedio



La banda azul indica la desviación típica de la serie 2005-2020. Las áreas grises indican el período con cubierta de hielo en la laguna Grande de Peñalara.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

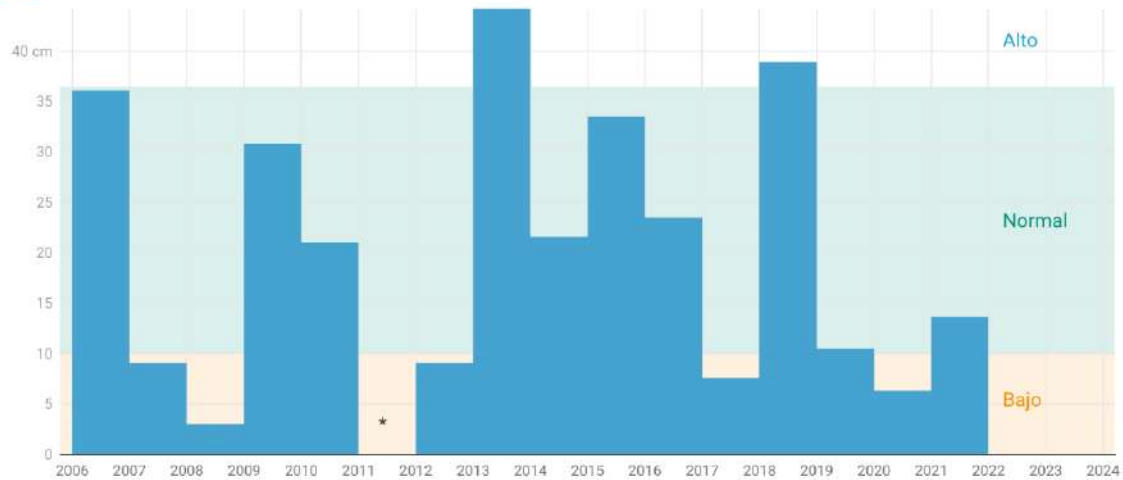
Figura 12. Espesor medio diario del manto nival en el invierno 2020/2021 en el Puerto de Cotos

De acuerdo con el sistema de indicadores del parque nacional, el espesor medio de la nieve (dic-mar) de la temporada 2020/2021 ha sido *normal* (Figura 13).

## Espesor medio de nieve

Estación RMPNSG - Cotos.

■ Espesor medio de nieve (cm)



El espesor medio de nieve en Cotos se obtiene como la media de las medias mensuales de los meses de diciembre a marzo. El espesor medio muestra una gran variabilidad interanual, por lo que con la serie disponible (2006-2016) solo se puede establecer tentativamente un rango normal, fuera del cual se considera un año como anómalo ( $\pm 1\sigma$ ,  $\approx 68\%$ ). \*El asterisco indica que no hay dato.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 13. Sistema de indicadores - Espesor medio del manto nival de la temporada invernal en el Puerto de Cotos

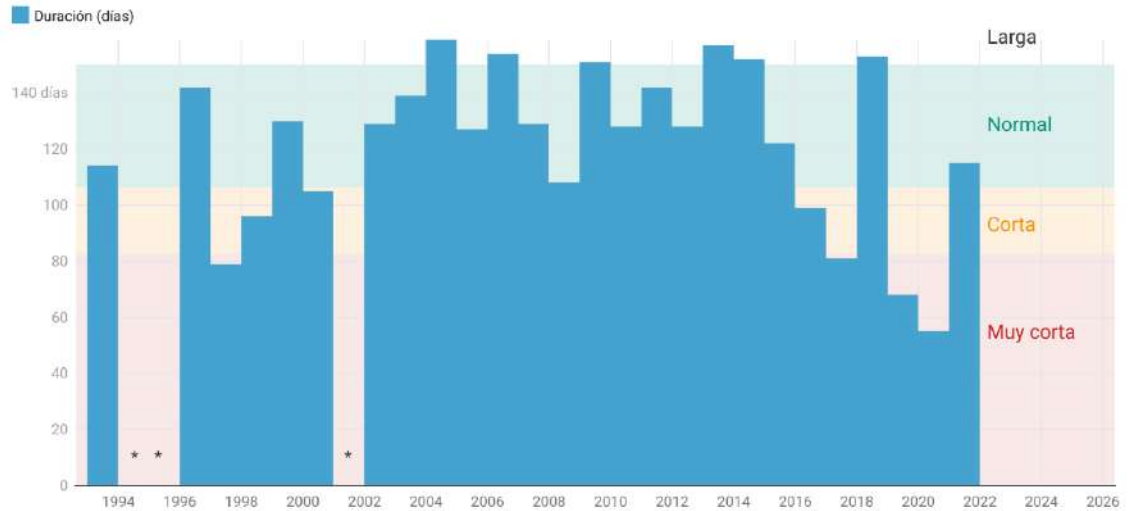
### 4.2. Cubierta de hielo

La formación de una cubierta de hielo es una característica distintiva de las lagunas de alta montaña. Esta cubierta de hielo tiene importantes repercusiones ecológicas sobre la columna de agua (agotamiento de oxígeno en fondo, limitación de la entrada de luz, etc.), pero además su fenología es un buen indicador del proceso de calentamiento global.

La cubierta de hielo de la temporada 2020/2021 se prolongó durante 115 días entre el 6 de diciembre y el 31 de marzo. Esto supone una cubierta *normal* en el sistema de indicadores del parque nacional tanto en su duración (Figura 14) como en la fecha de formación (Figura 15). Aunque se cumple el criterio de considerarlo como una única cubierta continua, entre el 2 y el 6 de febrero de 2021 se produjo un deshielo parcial quedando la laguna cubierta de hielo sólo en un 50%. En este sentido, se rompe en cierta medida la tendencia de los últimos años a tener una duración *corta* o *muy corta* y una formación muy tardía. Conviene recordar que la larga duración de 2017-2018 estuvo condicionada por un alud de nieve que impactó contra la cubierta de hielo, provocando la acumulación de una enorme cantidad de nieve en la laguna, por lo que realmente no tendría una relación directa con las condiciones meteorológicas de esa temporada.

## Duración de la cubierta de hielo

Laguna Grande de Peñalara.



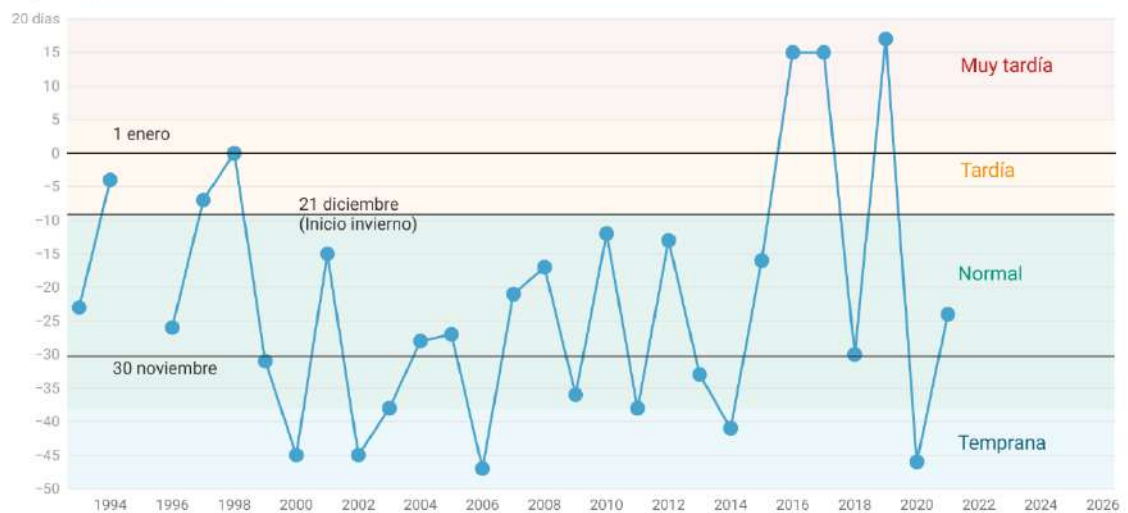
La duración de la cubierta de hielo es el número de días entre el primer día en el que la laguna está 100% cubierta de hielo y la fecha del último día de la temporada en el que la laguna tiene algo de hielo. Con la serie de datos 1993-2016 se han establecido umbrales para considerar un año dentro de la normalidad, como anómalo ( $\pm 1\sigma$ ,  $\approx 68\%$ ), o extraordinariamente anómalo ( $\pm 2\sigma$ ,  $\approx 95$ ). El asterisco indica que no hay datos.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 14. Sistema de indicadores - Duración de la cubierta de hielo en la Laguna de Peñalara.

## Fecha de formación de la cubierta de hielo

Laguna Grande de Peñalara.



Primera fecha en la que la laguna está completamente helada, tomando el 1 de enero como día 0. Con la serie de datos obtenidos del seguimiento limnológico durante 24 años (1993-2016), la fecha media de formación de la cubierta es el 6 de diciembre. Se han establecido umbrales para considerar un año dentro de la normalidad, como anómalo ( $\pm 1\sigma$ ,  $\approx 68\%$ ), o extraordinariamente anómalo ( $\pm 2\sigma$ ,  $\approx 95$ ).

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 15. Sistema de indicadores - Fecha de formación de la cubierta de hielo en la Laguna de Peñalara.

Hay una correlación significativa de la duración de la cubierta de hielo tanto con la fecha de formación (Figura 16a,  $p < 0.01$ ) como con la fecha de deshielo (Figura 16b,  $p < 0.001$ ). En el primer caso, el coeficiente de determinación es bastante más bajo ( $r^2 = 0.27$ ) que el caso de la fecha de deshielo ( $r^2 = 0.57$ ) de lo que se deduce que, si bien ambas fechas lógicamente tienen influencia en la duración de la cubierta, la fecha de deshielo es un predictor mucho más fiable de la duración total de la cubierta de hielo.

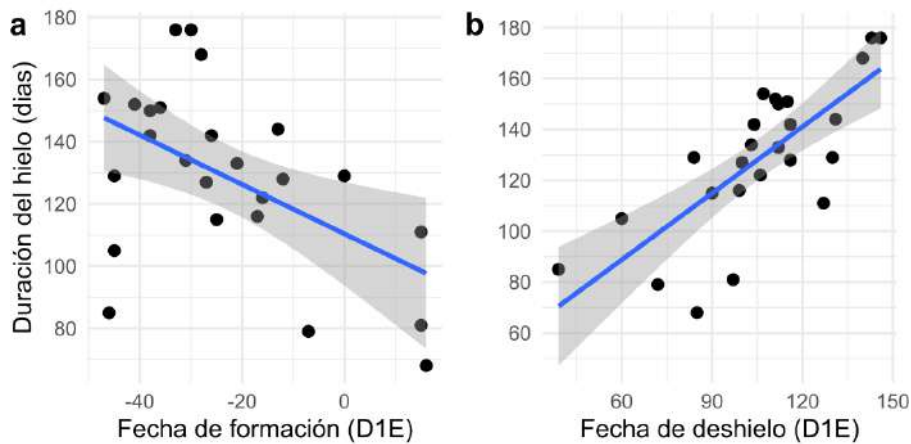


Figura 16. Correlación entre la duración de la cubierta de hielo y a) la fecha de formación del hielo; y b) la fecha de deshielo. D1E = Días desde el 1 de enero.

A largo plazo, no se ha encontrado una tendencia significativa en el número de días de la cubierta de hielo (Figura 17), la duración total (en el caso de cubiertas de hielo discontinuas) o la fecha de formación [MAKESSENS  $Z > 0.05$ ; (Salmi et al., 2002)]. Para el análisis se ha eliminado el año 2018 porque la duración de la cubierta estuvo muy influenciada por el alud de nieve mencionado anteriormente.

En cualquier caso, es necesario recordar que el calentamiento climático observado en la Sierra de Guadarrama es mucho más intenso en invierno que en cualquier otra época del año (Tabla 1), por lo que es previsible un claro impacto sobre la fenología de la cubierta de hielo.

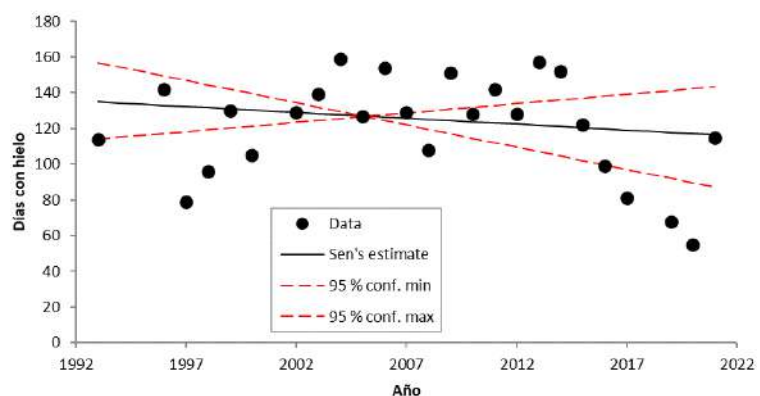
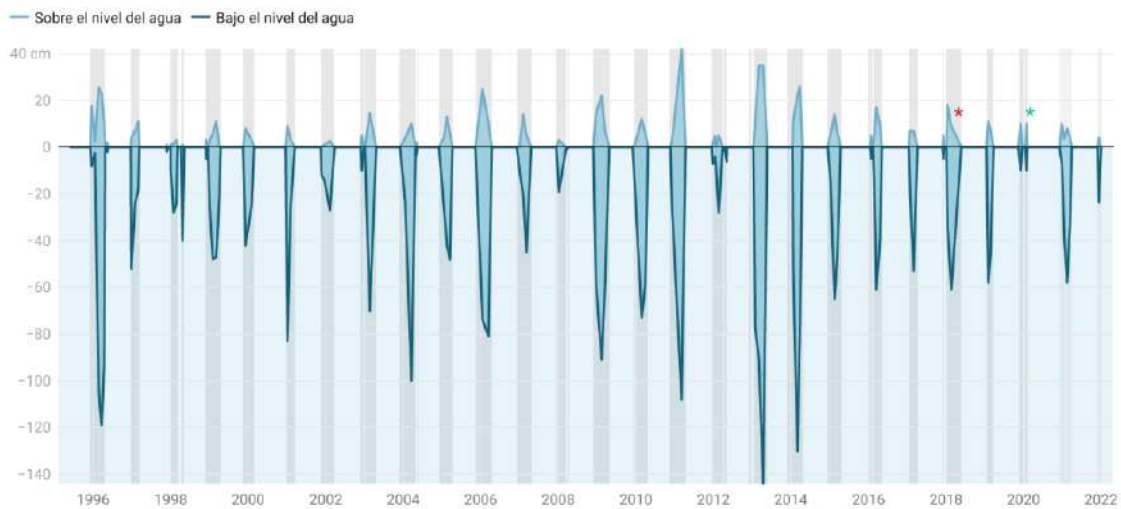


Figura 17. Estimación de la tendencia del número de días con hielo en la laguna. Se ha eliminado el año 2018 porque la duración de la cubierta estuvo muy influenciada por un alud de nieve que cayó sobre la laguna.

En cuanto al espesor, la Figura 18 muestra el espesor observado a lo largo del seguimiento limnológico mensual. Hay que señalar que los espesores observados no tienen por qué ser los máximos, ya que se corresponden con las mediciones puntuales realizadas durante los muestreos de campo. De hecho, en la temporada 2017/2018 se produjo un gran alud de nieve que rellenó prácticamente toda la cubeta de la laguna. El máximo espesor son los 179 cm observados el 16 de abril de 2013. En la temporada 2020/2021 se alcanzó un espesor máximo de 66 cm.

### Espesor de la cubierta de hielo

Espesor observado durante los muestreos en el punto de máxima profundidad



El espesor se mide por encima y por debajo del nivel de agua en el agujero perforado para la realización del muestreo mensual. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo. \* En 2018 el espesor fue mucho mayor debido a un alud de nieve, pero no pudo llegar a medirse con precisión. \* En 2020 el espesor era tan escaso que no se pudo acceder con seguridad para realizar las mediciones.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación - Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama - Creado con Datawrapper

Figura 18. Espesor de la cubierta de hielo en la Laguna de Peñalara durante todo el periodo del seguimiento limnológico mensual.

También hay una correlación significativa ( $p < 0.01$ ,  $r^2 = 0.36$ ) entre la duración de la cubierta de hielo y el espesor máximo de este (Figura 19), es decir, generalmente cuanto mayor sea el espesor de la cubierta de hielo también es mayor su duración.

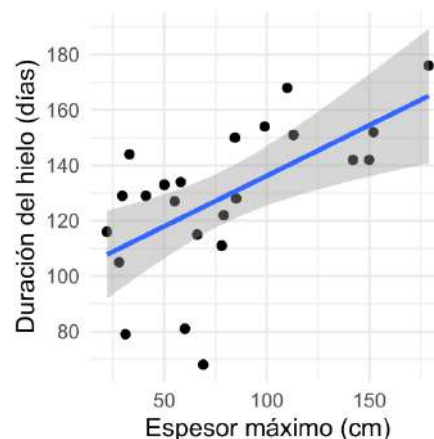


Figura 19. Correlación entre el espesor máximo y la duración de la cubierta de hielo.

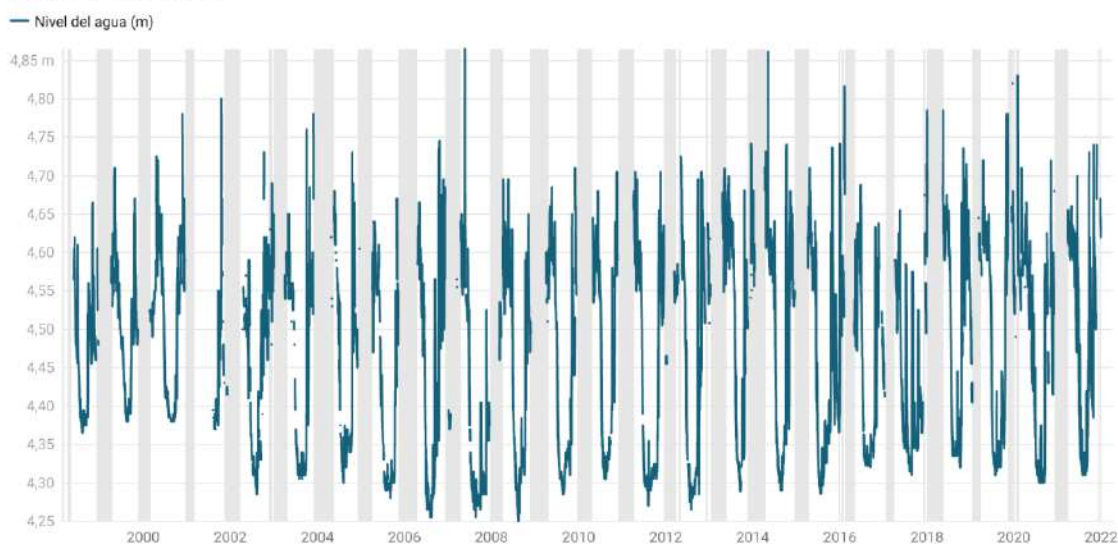


### 4.3. Nivel del agua. Tasa de renovación.

La Figura 20 muestra el nivel diario del agua en la Laguna de Peñalara durante todo el periodo del seguimiento limnológico mensual, medido durante la época sin cubierta de hielo. Esta serie se basa en los datos tomados diariamente en un limnómetro de referencia por el personal de vigilancia del parque nacional. En general, el nivel del agua es alto justo después del deshielo (Figura 23), para descender más o menos rápidamente a principios de verano. A lo largo del verano permanece en niveles bajos, con breves subidas ocasionales debido a tormentas estivales, para volver a aumentar con las lluvias de otoño. La oscilación media anual del nivel del agua son 45 cm entre los años 1998-2021.

#### Nivel del agua - Medida puntual diaria

Laguna Grande de Peñalara



Medido en una escala limnométrica por el personal de vigilancia del parque nacional. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

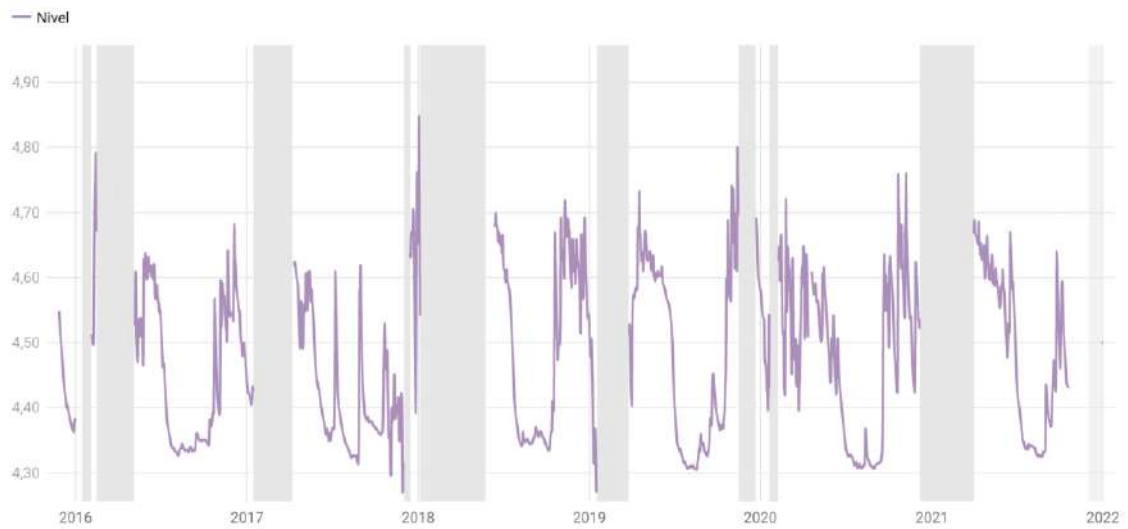
Figura 20. Nivel del agua diario en la Laguna de Peñalara (1998-2021), conforme al registro manual diario del limnómetro de la laguna

Desde principios de diciembre de 2015 está instalado un sensor de presión que permite el registro automático del nivel del agua con una frecuencia mucho mayor (cinco-minutal). Además, este sensor permite obtener datos durante períodos en la que la vigilancia no puede acceder a la laguna, permite obtener un valor medio del nivel diario en lugar de un valor puntual, y también evita los errores asociados a la lectura y registro manual de los datos.

La Figura 21 muestra el nivel medio diario del agua en la laguna de Peñalara de toda la serie disponible mediante el sensor automático, mientras que la Figura 22 detalla los datos disponibles para el año 2021 (la última descarga de datos se realizó el 19 de octubre).

### Nivel del agua - media diaria

Sensor automático situado a 4 m en el punto de máxima profundidad.



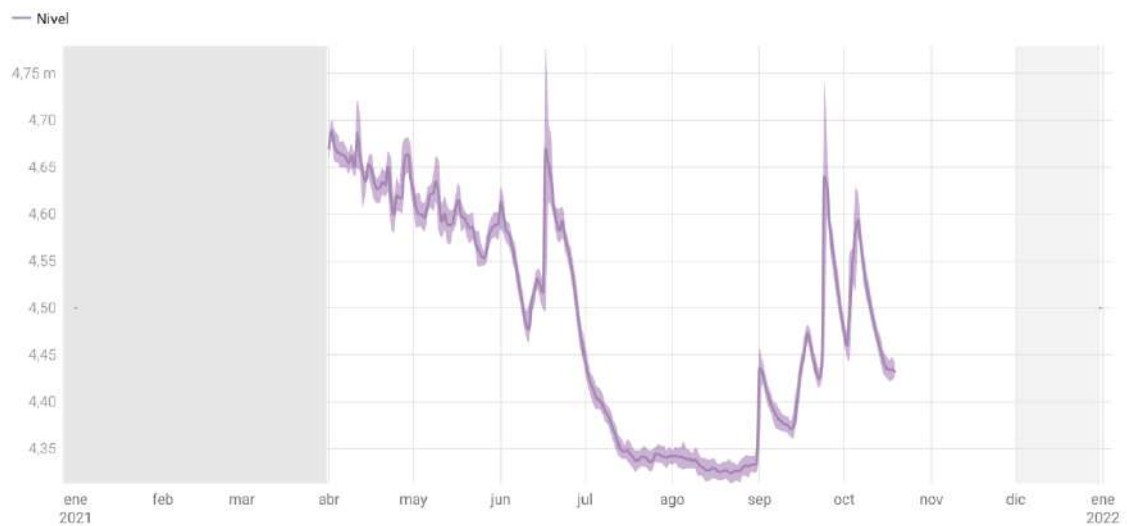
El promedio diario se calcula a partir de las medidas quince-minutales. La banda morada indica el máximo y mínimo diario. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 21. Media diaria del nivel del agua en la Laguna de Peñalara entre 2016 - 2021, a partir de los datos de sensor automático de medida del nivel.

### Nivel del agua - media diaria 2021

Sensor automático situado a 4 m en el punto de máxima profundidad.



El promedio diario se calcula a partir de las medidas quince-minutales. La banda morada indica el máximo y mínimo diario. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 22. Rango y media diaria del nivel del agua en la Laguna de Peñalara durante 2021, a partir de los datos de sensor automático de medida del nivel.

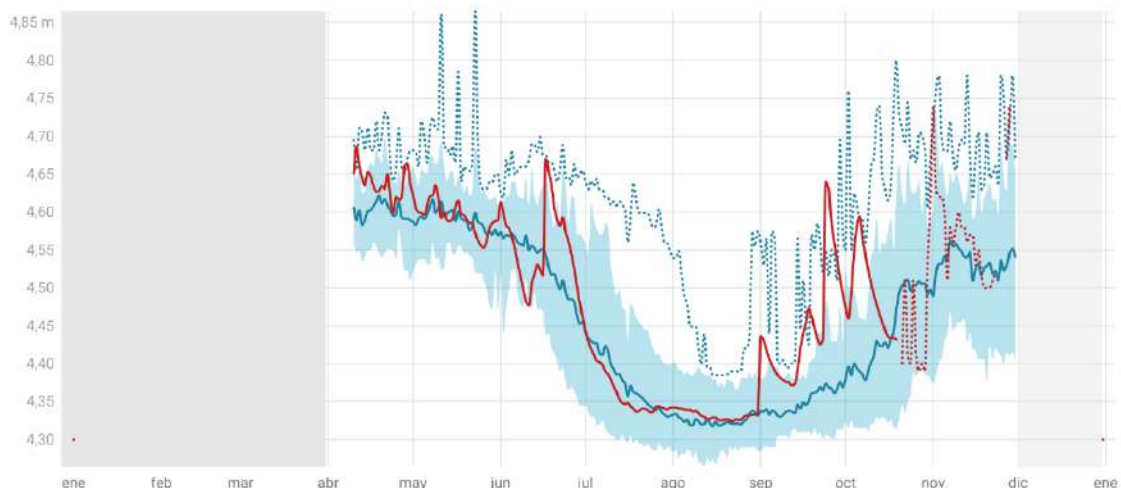
Con el sensor automático se puede conocer la oscilación diaria del nivel del agua. Así, para toda la serie 2016-2021 la oscilación media intradiaria es de 3.55 cm, con un máximo registrado de 45.9 cm. Con los datos disponibles por el momento de 2021, la media de este año es ligeramente inferior (3.25 cm), con un máximo intradiario de 28.7 cm y una oscilación anual de 36.4 cm.

A partir de la serie histórica disponible, se puede construir un año tipo con la media diaria y el percentil 10-90% esperable en la variación de ese nivel, de manera que se pueda comparar un año concreto con ese año tipo. En esta comparación de 2021 (Figura 23), destaca en primer lugar el mes de junio: en su primera mitad el nivel estuvo bastante por debajo de la media de la serie histórica (1998-2020), mientras que la segunda mitad estuvo muy por encima de esta media, llegando incluso a marcar un máximo histórico. Este comportamiento refleja claramente el patrón de precipitaciones de ese mes (Figura 6).

### Nivel del agua 2021 - Comparación con año tipo

Laguna Grande de Peñalara

— Promedio (1998-2020)    ···· Máximo (1998-2020)    — 2021    ···· 2021 (Provisional)



La banda azul indica el rango de los percentiles 10-90% de la serie 1998-2020. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo en la laguna Grande de Peñalara. Se presentan los datos entre el 10 de abril y el 30 de noviembre, periodo en el que existen datos sin cubierta de hielo de al menos 8 años.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 23. Variación del nivel del agua en la Laguna de Peñalara durante 2021 en comparación con el año tipo de la serie 1998-2020 (rango del percentil 10%-90%, promedio y nivel máximo). Los datos provisionales provienen del registro manual por parte de la vigilancia del parque (línea punteada)

En segundo lugar, destaca claramente un período desde inicios de septiembre a mediados de octubre con un nivel del agua muy alto asociado a nuevos episodios de precipitación (Figura 6), incluyendo un período entre el 24 y el 27 de septiembre con un nivel del agua por encima del máximo registrado con anterioridad. El siguiente período de la gráfica está basado en las medidas manuales del limnómetro, ya que la última descarga del sensor de nivel se realizó al 19 de octubre. A falta de confirmar con los datos automáticos, se observa que seguidamente se sucede de nuevo una etapa con niveles relativamente bajos para volver a marcar un nuevo nivel máximo a principios de noviembre. En cualquier caso, esta época del año (octubre-noviembre)

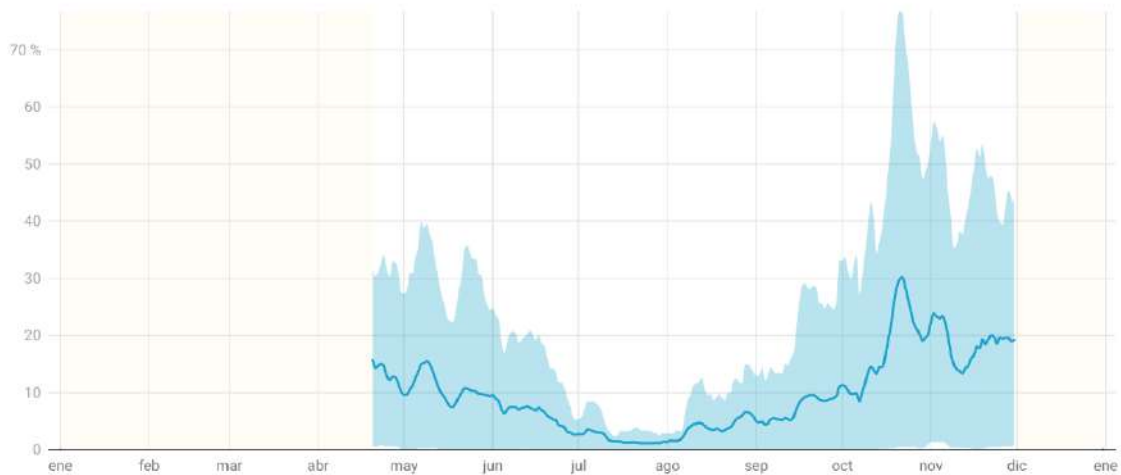
suele estar marcada por fuertes fluctuaciones en el nivel dependiendo de las precipitaciones otoñales (Figura 21).

A partir de los cambios de nivel y la precipitación se puede calcular un porcentaje diario de renovación. La Figura 24 muestra este porcentaje de renovación para un año tipo, suavizado mediante una media móvil de 7 días para el período 1998-2021. Como puede observarse, el porcentaje del agua de la laguna que se renueva diariamente es bastante elevado, superando generalmente el 10% de media durante el deshielo (finales de primavera) e incluso el 20% gran parte del otoño. Para el conjunto del periodo sin cubierta de hielo el porcentaje de renovación es del 9.7% o el equivalente a un tiempo de residencia de 10 días. Considerando sólo el verano, la época de mayor estabilidad, el porcentaje medio de renovación se reduce al 3.8% y el tiempo de residencia media aumenta hasta 26 días.

### Porcentaje de renovación - Año tipo

Laguna Grande de Peñalara

Promedio (1998-2021)



La banda azul indica el rango de los percentiles 10-90% de la serie 1998-2021. Este rango y el promedio están suavizados como la media móvil de 7 días. Las áreas grises indican el periodo en el que la laguna suele estar cubierta de hielo. Se presentan los datos entre el 20 de abril y el 30 de noviembre, periodo en el que existen datos sin cubierta de hielo de al menos 9 años.

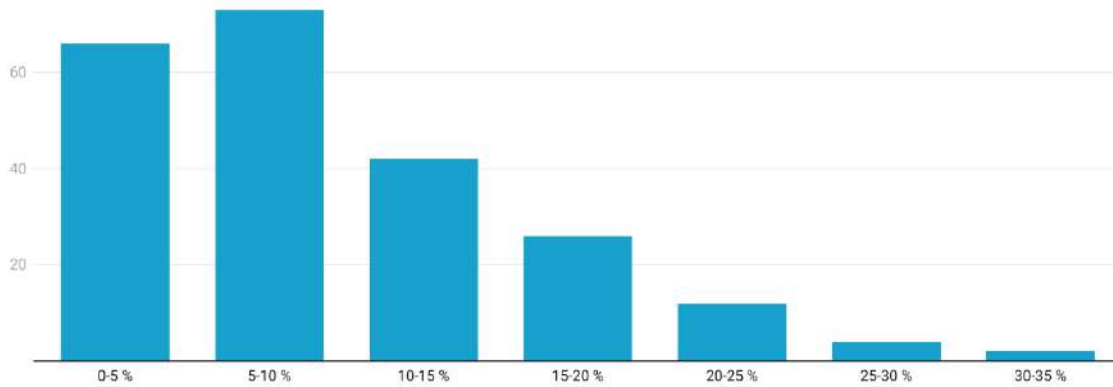
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 24. Porcentaje de renovación en la Laguna de Peñalara, calculado como la media móvil de 7 días para el período 1998-2021.

La Figura 25 muestra el histograma de las frecuencias de porcentajes de renovación diarios obtenidos a partir del año tipo calculado sobre la serie 1998-2021 (suavizado con media móvil de 7 días). Los porcentajes de renovación más frecuentes se sitúan entre el 5-10%, seguido de aquellos los que están por debajo de 10% diario. El 80% de los períodos de 7 días está por debajo del 15% de renovación diaria, mientras que períodos de 7 días en los que se renueve más de un cuarto de la laguna al día solo aparecen el 0.9% de media en el año tipo. Sin embargo, hay que tener un cuenta que frecuentemente determinados sucesos de avenida aumentan muy considerablemente el porcentaje de renovación a nivel diario (Figura 26)

## Porcentaje de renovación - Frecuencia

Laguna Grande de Peñalara



El porcentaje de renovación corresponde al año tipo entre el 20 de abril y el 30 de noviembre, periodo en el que existen datos sin cubierta de hielo de al menos 9 años. El porcentaje de renovación está suavizado como la media móvil de 7 días.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

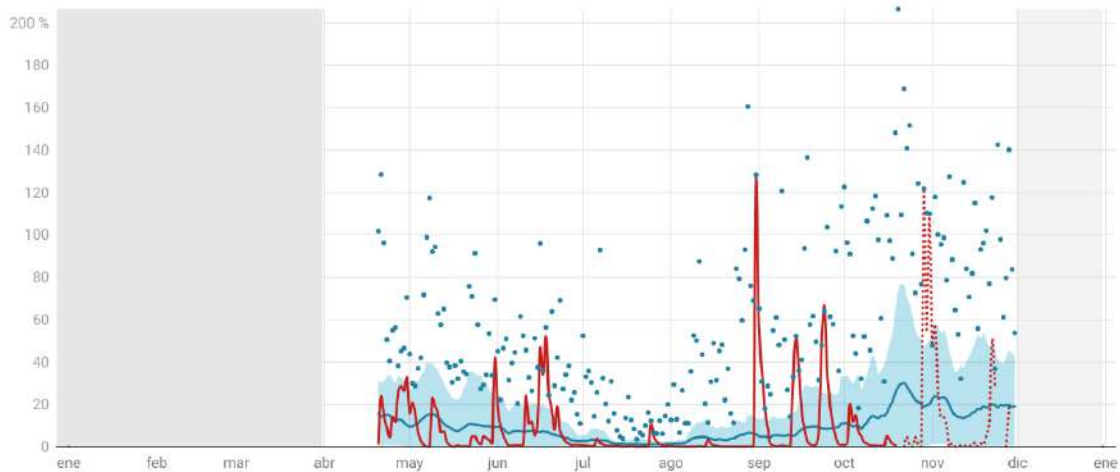
Figura 25. Histograma de los porcentaje de renovación diarios en la Laguna de Peñalara, calculados como la media móvil de 7 días para el período 1998-2021.

La Figura 26 muestra cómo ha variado el porcentaje diario de renovación del agua de la laguna durante 2021 en comparación con el año tipo presentado en la Figura 24, incluyendo algunos datos provisionales de la parte final del año.

## Porcentaje de renovación 2021 - Comparación con año tipo

Laguna Grande de Peñalara

— Promedio (1998-2021) · Máximo diario (1998-2021) — 2021 · - - - 2021 (provisional)



La banda azul indica el rango de los percentiles 10-90% de la serie 1998-2021. Este rango y el promedio están suavizados como la media móvil de 7 días. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo en la laguna Grande de Peñalara. Se presentan los datos entre el 20 de abril y el 30 de noviembre, periodo en el que existen datos sin cubierta de hielo de al menos 9 años.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 26. Variación del porcentaje de renovación en la Laguna de Peñalara durante 2021 en comparación con el año tipo de la serie 1998-2021 (rango del percentil 10%-90%, promedio y nivel máximo). Los datos provisionales provienen del registro manual por parte de la vigilancia del parque (línea punteada)



El porcentaje medio de renovación en 2021 ha sido del 9.4% para el periodo considerado (10.6 días de tiempo de residencia). Si se tiene en cuenta sólo el periodo de verano el porcentaje de renovación ha sido de 5.6% (17.8 días de tiempo de residencia). Aunque en su conjunto el año 2021 se ha comportado de una manera muy similar a la media, si se contempla sólo el periodo de verano se aprecia que el tiempo de residencia ha sido sensiblemente inferior a la media.

En 2021 se produjeron 6 episodios (2 de ellos por confirmar con los datos del sensor automático) con un porcentaje diario de renovación mayor del 50% (media del 74%), durante un total de 11 días (4 episodios duraron sólo 1 día). La circulación de agua más importante se produjo entre el 29 de octubre y el 2 de noviembre. El máximo de porcentaje de renovación de 2021 fue de 127% (31 de agosto).

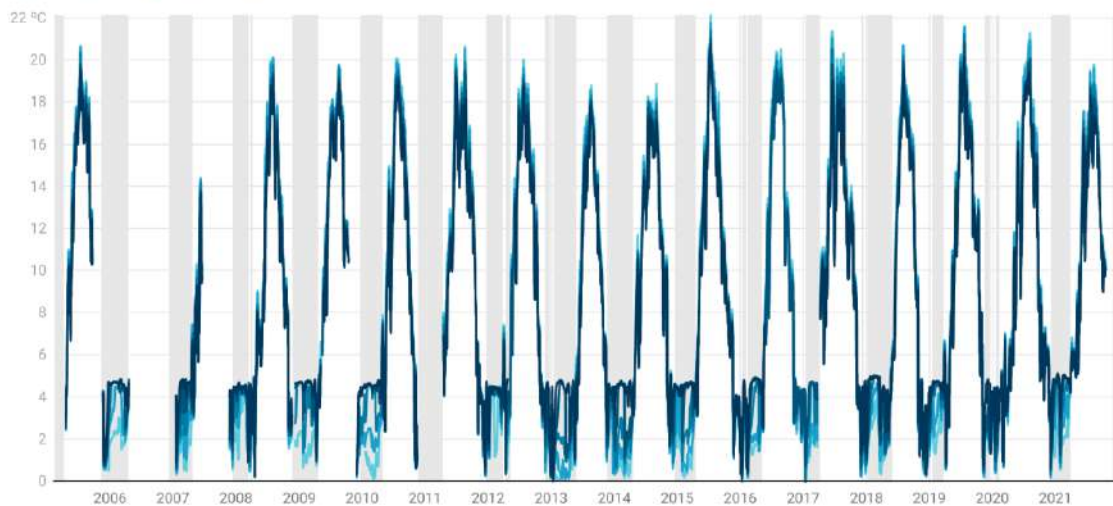
#### 4.4. Temperatura del agua. Estabilidad de la Columna de agua.

La Figura 27 muestra la evolución de la temperatura media del agua a diferentes profundidades a lo largo de toda la serie disponible, mientras que la Figura 28 presenta con detalle el año hidrológico 2021. Se presenta el año hidrológico en vez del año natural porque habitualmente no se puede acceder a los registradores de temperatura hasta la primavera del año siguiente, y además suele ser la mejor manera de observar la estratificación térmica de la columna de agua durante el periodo con cubierta de hielo.

##### Temperatura acuática media diaria

Cadena de termistores situados en el punto de máxima profundidad.

— 0,5m — 1m — 2m — 3m — 4m



El promedio diario se calcula a partir de las medidas diez-minutales. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

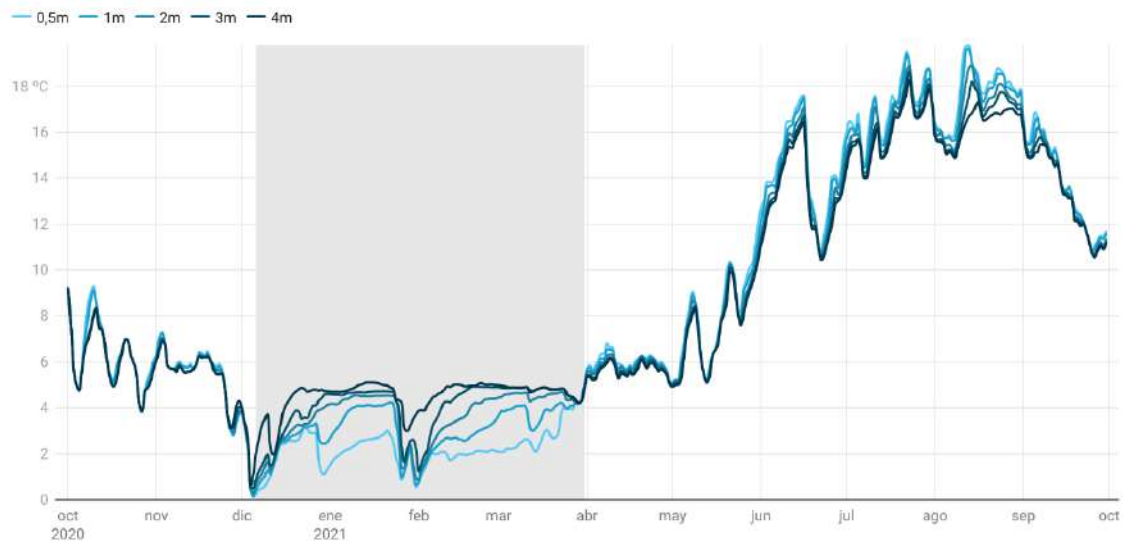
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 27. Temperatura media diaria del agua en la Laguna de Peñalara.



## Temperatura acuática media diaria. Año hidrológico 2021.

Cadena de termistores situados en el punto de máxima profundidad.



El promedio diario se calcula a partir de las medidas diez-minutales. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.  
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 28. Temperatura media acuática diaria durante 2021 en la Laguna de Peñalara.

Como puede apreciarse, durante el periodo invernal 2020-2021 se produce una clara estratificación térmica debajo de la cubierta de hielo, con una cierta ruptura de la estratificación a finales de enero/principios de febrero relacionada con el deshielo parcial de la cubierta de hielo (apartado 4.2). Al igual que en el año anterior, 2021 tuvo la particularidad de presentar aguas relativamente frías hasta bien entrada la primavera ya que hasta el 29 de mayo no se alcanzaron los 10°C de temperatura media. Seguidamente, tras un rápido aumento de su temperatura a mediados de junio se observa un importante descenso asociado a una bajada de la temperatura ambiental (Figura 5) e intensas precipitaciones (Figura 6). El 13 de agosto se alcanza la máxima temperatura de la columna de agua en 2021, seguido de un periodo de unos 15 días en las que se desarrolla un notable gradiente de temperatura entre la superficie y el fondo de la laguna.

El sistema de indicadores incluye la evaluación de la temperatura media mensual acuática del mes más cálido (Figura 29). Conforme a esta evaluación, 2021 se caracterizó por una temperatura del agua *normal*. En cierto modo viene a atenuar una tendencia observada en los últimos seis años, con cinco de ellos por encima de la media de la serie 2005-2021. No obstante, durante ese período se ha observado una tendencia al calentamiento de 0.61°C/década, aunque debido a la gran variabilidad interanual no es significativa [MAKESENS  $Z > 0.05$ ; (Salmi et al., 2002)].

## Temperatura de la Laguna Grande de Peñalara

Temperatura media mensual del agua superficial del mes más cálido.



Media mensual del mes de mayores temperaturas a 0.5 m de profundidad. Los valores disponibles entre 1998 y 2016 indican que en promedio la temperatura media del mes más cálido es de 18.04 °C. Se han establecido umbrales para considerar un año dentro de la normalidad, como anómalo ( $\pm 1\sigma$ ,  $\approx 68\%$ ), o extraordinariamente anómalo ( $\pm 2\sigma$ ,  $\approx 95\%$ ).

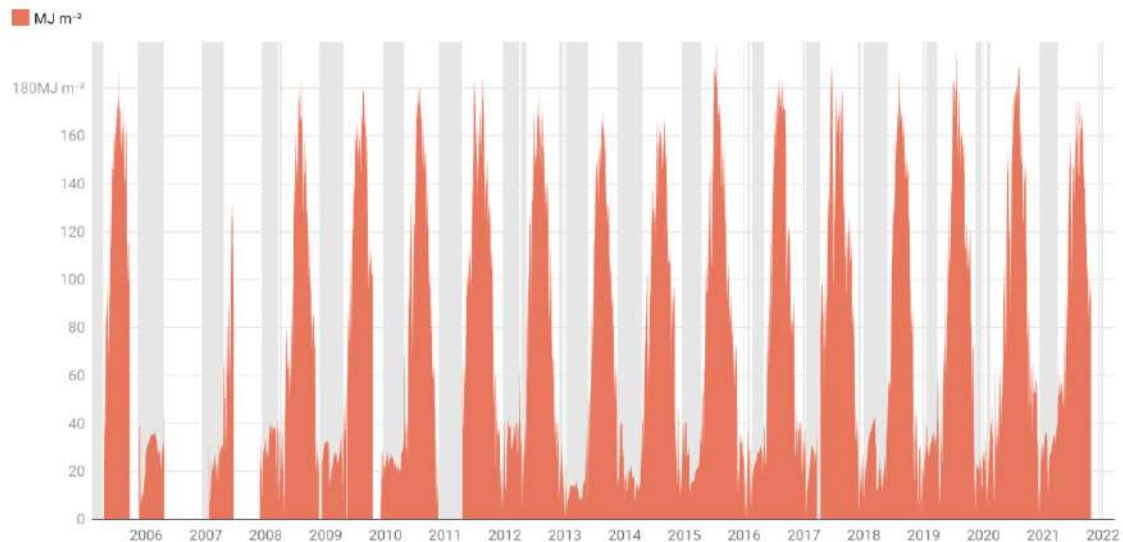
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 29. Sistema de indicadores - Temperatura media del agua superficial del mes más cálido en la Laguna de Peñalara.

La Figura 30 muestra el contenido de calor en la masa de agua de la laguna, calculado a partir de la temperatura y el volumen de agua a las distintas profundidades (Winslow et al., 2019).

## Energía interna

Calor acumulado en la columna de agua.



Se calcula a partir de las temperaturas medias diarias a 5 profundidades de la columna de agua. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 30. Contenido de calor de la columna de agua en la Laguna de Peñalara para la serie histórica 2005-2021.

Como se trata de una laguna relativamente somera y de carácter polimíctico discontinuo frío [según la clasificación de (Lewis Jr, 1983)], el contenido de calor o energía interna recuerda claramente al gráfico de las temperaturas a distintas profundidades (Figura 27). Entre 2008 y 2021 la laguna alcanzó un máximo de  $199.2 \text{ MJ m}^{-2}$  (2015), con un promedio de contenido de calor en el momento del máximo anual de  $183.2 \text{ MJ m}^{-2}$ . Se puede calcular el balance térmico anual para conocer la energía neta necesaria para realizar estos cambios en el contenido de calor de la laguna. Así, en término medio se requieren  $178.8 \text{ MJ m}^{-2}$  para realizar todo el proceso de calentamiento desde el deshielo hasta que alcanza su máximo contenido de calor, y concretamente en 2021 este balance fue de  $165.8 \text{ MJ m}^{-2}$

Independientemente del contenido de calor acumulado, es fundamental conocer como el gradiente de temperatura de la columna de agua se traduce en una cierta estratificación de la columna de agua que pueda dificultar los movimientos turbulentos. Por ello, se ha calculado el índice de estabilidad de Schmidt (S) como un indicador del trabajo necesario para mezclar dicha columna (Figura 31 toda la serie histórica y Figura 32 detalle del año hidrológico 2021).

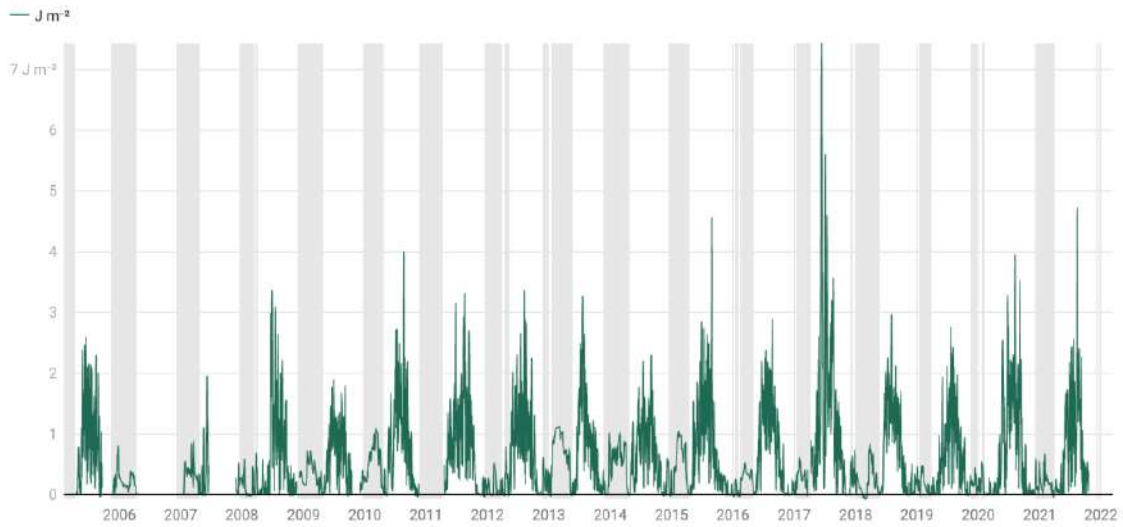
Cuanto mayor es el valor de S mayor es la estratificación de la columna de agua y su resistencia a la mezcla, y se produce cuando es mayor el gradiente de temperatura entre superficie y fondo. El índice de estabilidad de Schmidt está expresado como energía por unidad de superficie que debe ser aportada (ej. viento) para mezclar y conducir a la masa de agua a una homogeneidad térmica.

Los niveles de S en la Laguna de Peñalara son bajos, es decir, se produce fácilmente la mezcla de la columna de agua en respuesta incluso a vientos moderados. En cualquier caso, la máxima estabilidad se alcanza en el período libre de hielo. Una de las situaciones que generan mayor estabilidad es cuando se producen deshielos tardíos, con lo que hay una situación con un agua muy fría y un entorno ambiental de alta insolación y altas temperaturas atmosféricas. En este caso, la situación suele ser transitoria mientras que la columna de agua va alcanzando las temperaturas máximas del año. La otra situación en la que se suele producir el máximo anual es precisamente cuando la superficie de la laguna alcanza sus máximas temperaturas anuales y perduran condiciones atmosféricas muy estables (alta insolación, escaso viento y baja tasa de renovación). Esta última situación se prolonga tanto como se mantengan estas condiciones de estabilidad.

En el verano de 2021 se ha alcanzado el segundo máximo registro de estabilidad de Schmidt de la serie 2005-2021, asociado al máximo de temperatura del 12-13 de agosto. Como se ha comentado al describir los gradientes de temperatura de la columna de agua de la Figura 28, a este máximo le sigue un período de relativa estabilidad como consecuencia de perdurar en el tiempo las mayores diferencias entre superficie y fondo.

### Estabilidad de Schmidt

El índice de estabilidad de Schmidt mide la estabilidad de la columna como el trabajo necesario para mezclarla homogéneamente.



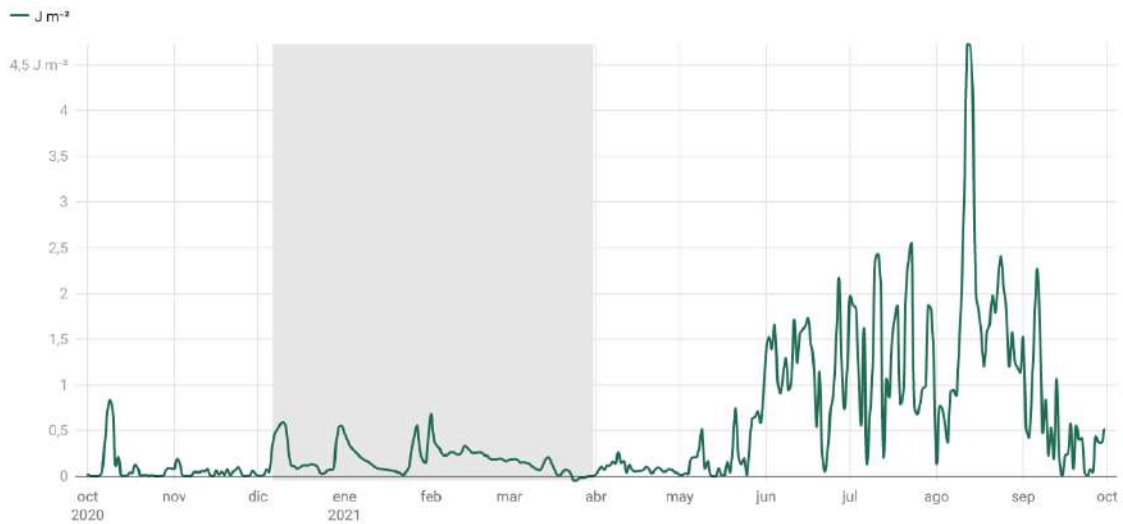
Se calcula a partir de las temperaturas medias diarias a 5 profundidades de la columna de agua y de las áreas de la masa de agua a esas mismas profundidades. Las bandas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 31. Índice de estabilidad de Schmidt en la Laguna de Peñalara para la serie histórica 2005-2021.

### Estabilidad de Schmidt. Año hidrológico 2021

El índice de estabilidad de Schmidt mide la estabilidad de la columna como el trabajo necesario para mezclarla homogéneamente.



Se calcula a partir de las temperaturas medias diarias a 5 profundidades de la columna de agua y de las áreas de la masa de agua a esas mismas profundidades. Las bandas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 32. Índice de estabilidad de Schmidt en la Laguna de Peñalara, detalle de 2021.

Hay dos tendencias que es interesante resaltar, si bien ninguna de los dos es significativa ( $p > 0.05$ ). Por un lado, se observa que la estabilidad máxima de la columna de agua está aumentando a lo largo de la serie histórica disponible (Figura 33a). Por otro lado, el mes en el que se produce la estabilidad máxima anual también se está retrasando, desplazándose desde el inicio del verano a la parte central o final de éste (Figura 33b). La primera tendencia es posible que se siga observando en el futuro, acompañando al cambio climático y el aumento de las temperaturas ambientales (Figura 3). En cuanto a la segunda tendencia, probablemente se mantenga el máximo en los meses de julio o agosto, pero difícilmente se trasladará a septiembre debido a su menor radiación solar y condiciones meteorológicas menos estables.

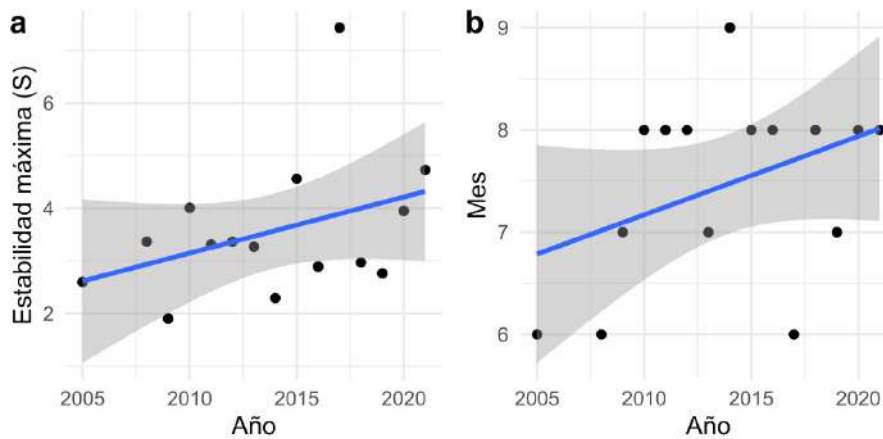


Figura 33. A) Índice de estabilidad de Schmidt máximo (S.max) anual en la Laguna de Peñalara. B) Mes del año en el que se produce el máximo anual del índice de estabilidad de Schmidt.

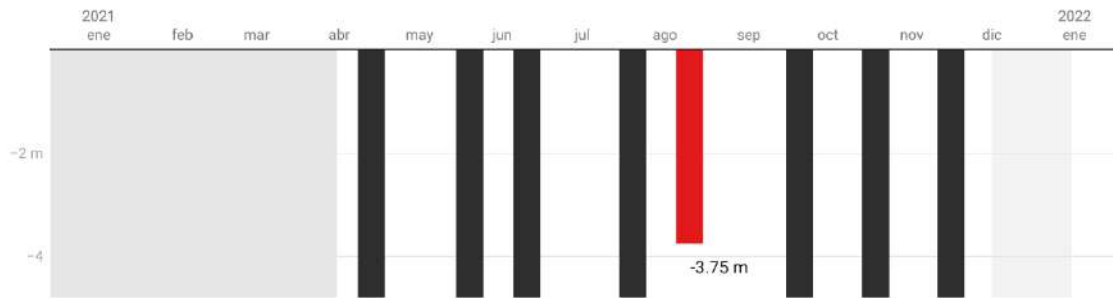
#### 4.5. Transparencia

El ambiente lumínico en la columna de agua es clave para que se predomine el proceso de producción primaria o, por el contrario, domine el proceso de degradación de materia orgánica. Es habitual hacer una estimación de la transparencia de la columna de agua con un disco de Secchi: un disco de 20 cm de diámetro atado a una cinta métrica y pintado de blanco y negro en cuartos alternativos, que se sumerge en la columna de agua hasta que se pierde de vista. En general se admite que la zona fótica (con suficiente luz como para que se dé producción primaria neta) alcanza aproximadamente el doble de la profundidad del disco de Secchi.

La Figura 34 muestra la profundidad registrada del disco de Secchi durante los muestreos realizados en 2021. El disco era visible en el fondo de la laguna durante todos los muestreos, salvo el realizado el 10 de agosto, por lo que la transparencia del agua ha sido muy elevada durante todo el período sin cubierta de hielo. De hecho, ningún otro año desde 1995 se había observado una profundidad mínima del disco de Secchi tan alta como la del 2021. En términos de posibilidad de producción primaria, la zona fótica coincidiría claramente con toda la columna de agua.

## Transparencia - Disco de Secchi

Profundidad a la que es visible el disco de Secchi



Las barras negras indican que el disco de Secchi era visible, al menos, a la profundidad máxima de la laguna. Las bandas grises indican el período con cubierta de hielo.  
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación - Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama - Creado con Datawrapper

Figura 34. Profundidad de la visibilidad del disco de Secchi durante los muestreos realizados en 2021.

La Figura 35 muestra el mínimo anual de visibilidad del disco de Secchi entre 1995 y 2021. Este mínimo anual ha oscilado entre 1.65 m y 3.75 m (media 2.80 m), y su evolución muestra una ligera tendencia (no significativa) a aumentar la transparencia.

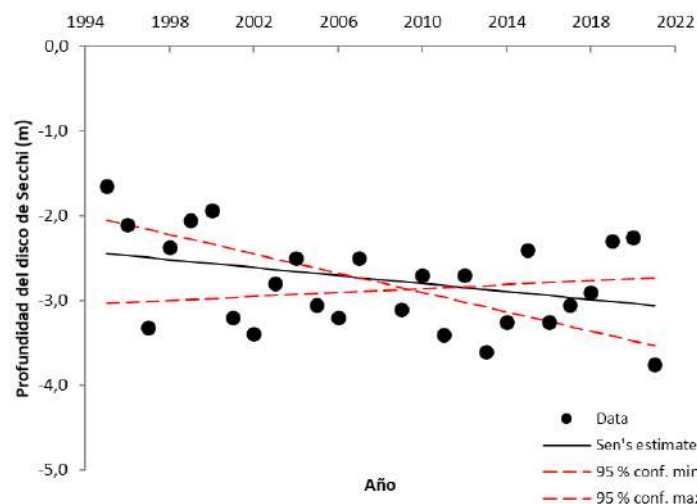


Figura 35. Profundidad de la visibilidad del disco de Secchi mínima anual 1995-2021

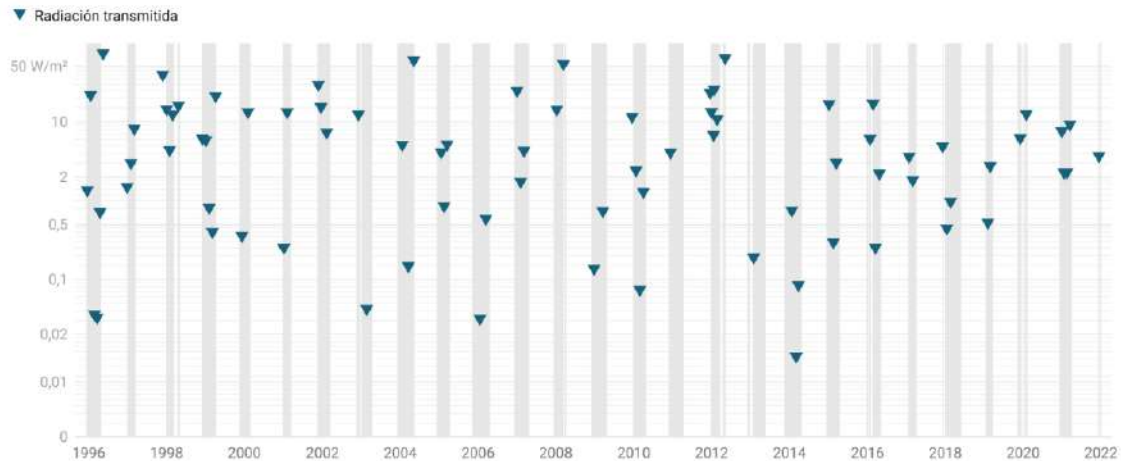
El disco de Secchi sólo se puede emplear durante la época libre de hielo. Durante el período invernal, la cantidad de luz que alcanza la columna de agua está determinada por las características de la cubierta de hielo. En primer lugar, la presencia de una cubierta de hielo modifica completamente el albedo de la laguna, pudiendo oscilar entre 0.09 para una cubierta de hielo negro y 0.97 para una cubierta con nieve recién caída. Como éste último caso es bastante más frecuente, se puede afirmar que más de un 80% de la radiación incidente sobre la cubierta es habitualmente reflejada directamente por ésta. Pero además, se han desarrollado unas ecuaciones empíricas para calcular la radiación que consigue atravesar la cubierta de hielo de los lagos (Petrov et al., 2005). Los resultados de su aplicación a los espesores y características



del hielo encontrados en la laguna de Peñalara se muestran en la Figura 36 (nótese la escala logarítmica).

### Radiación transmitida bajo la cubierta de hielo

Modelización de la radiación media que es capaz de llegar a la columna de agua atravesando la cubierta de hielo.



*La cubierta de hielo es una estructura heterogénea de diversas capas. La modelización se realiza teniendo en cuenta el tipo de hielo (blanco, negro, granizado), el espesor de cada capa y la radiación incidente teórica correspondiente al mes en curso. Obsérvese que los resultados se presentan en escala logarítmica.*

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación - Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama - Creado con Datawrapper

Figura 36. Radiación transmitida bajo la cubierta de hielo (modelización) durante el período 1996-2021.

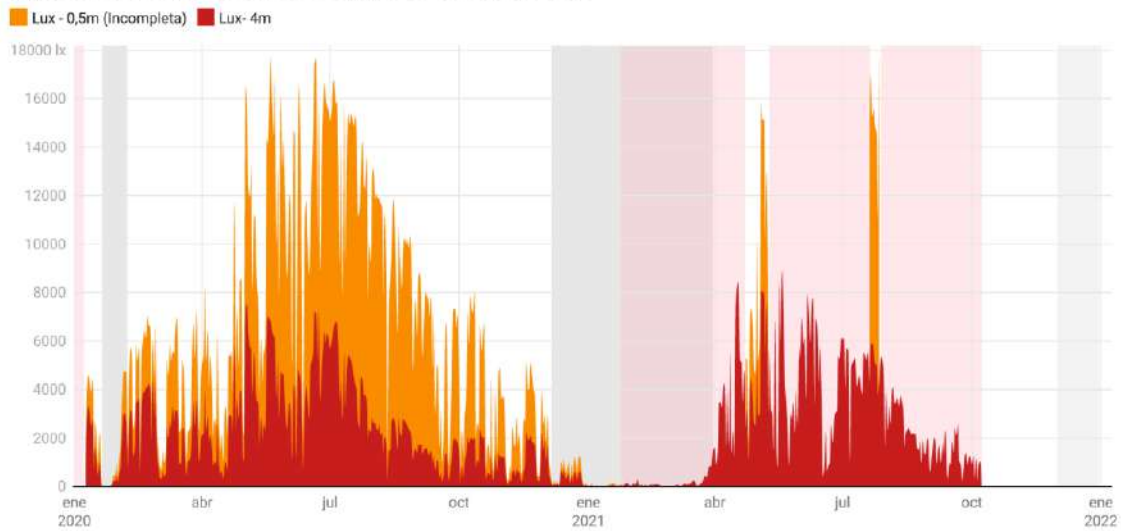
Como puede verse, es habitual que durante la época de la cubierta de hielo la radiación media que alcanza la columna de agua sea inferior a  $1 \text{ W/m}^2$ , llegando en ocasiones (como bajo la cubierta de hielo de 2012-2013) a  $2 \times 10^{-4} \text{ W/m}^2$ . De esta manera, los espesores de nieve y hielo blanco que se dan habitualmente en la laguna pueden llegar a impedir prácticamente la transmisión de luz a la columna de agua, limitando la producción primaria durante este período. Durante la cubierta de hielo 2020-2021, el valor mínimo calculado ha sido de  $2.18 \text{ W/m}^2$ , un valor no demasiado bajo.

Con el fin de conocer con mucho más detalle las condiciones de iluminación en la columna de agua, a principios de enero de 2020 se ubicaron dos registradores en continuo de luminosidad subacuática (Figura 37), aunque lamentablemente durante 2021 el sensor situado a 1m de profundidad ha presentado diversos problemas y por tanto la serie de datos está bastante incompleta. En cualquier caso, con el sensor situado a 4m se observa claramente el efecto de práctica oscuridad al formarse la cubierta de hielo, así como una mayor iluminación en los meses centrales del verano como consecuencia de la mayor altura del Sol sobre el horizonte y condiciones meteorológicas más estables.



## Iluminación subacuática - Media diaria 2020 - 2021

Registradores de luminosidad situados en el punto de máxima profundidad.



*El promedio diario se calcula a partir de las medidas diez-minutales. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo. Las bandas rosas indican un mal funcionamiento del sensor de superficie.*

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 37. Iluminación subacuática máxima diaria a dos profundidades durante 2020-2021 (hasta el 10 de octubre) en la Laguna de Peñalara. La serie de 1m está bastante incompleta como consecuencia de los problemas que ha tenido el sensor durante 2021 (bandas rosas).

### 4.6. Oxígeno disuelto

La Figura 38 muestra la evolución del oxígeno disuelto en la columna de agua registrado durante el seguimiento limnológico mensual. En este caso se expresa como porcentaje de saturación, es decir, la desviación de la concentración de oxígeno disuelto en el agua respecto a la capacidad del agua a esa temperatura para disolver este gas. De esta manera se puede observar la intensidad del proceso de producción primaria (% sat.  $O_2 > 100\%$ ) o los procesos de degradación de materia orgánica (% sat.  $O_2 < 100\%$ ).

En términos generales, la saturación de oxígeno en superficie oscila en torno al 100% a lo largo del año. Puntualmente se observan incrementos notables (más del 110%) como respuesta a un momento más productivo en la laguna. Sin embargo, el porcentaje de saturación de oxígeno en fondo (4m) muestra fluctuaciones muchos más acusadas. Por ejemplo, se observa que, bajo la cubierta de hielo de determinados años, se produce una bajada muy evidente del porcentaje de saturación. Este proceso de reducción de la concentración de oxígeno es típico de lagos y lagunas de alta montaña como consecuencia del proceso de degradación de materia orgánica en condiciones de nula o muy baja iluminación, relativa estabilidad de la columna de agua y desconexión del intercambio de gases con la atmósfera por la presencia de una gruesa cubierta de hielo. Esta materia orgánica que está siendo catabolizada procede de la *lluvia* de algas

senescentes de la parte superior de la columna de agua, así como de la materia orgánica que se ha ido acumulando en el sedimento a lo largo del período estival.

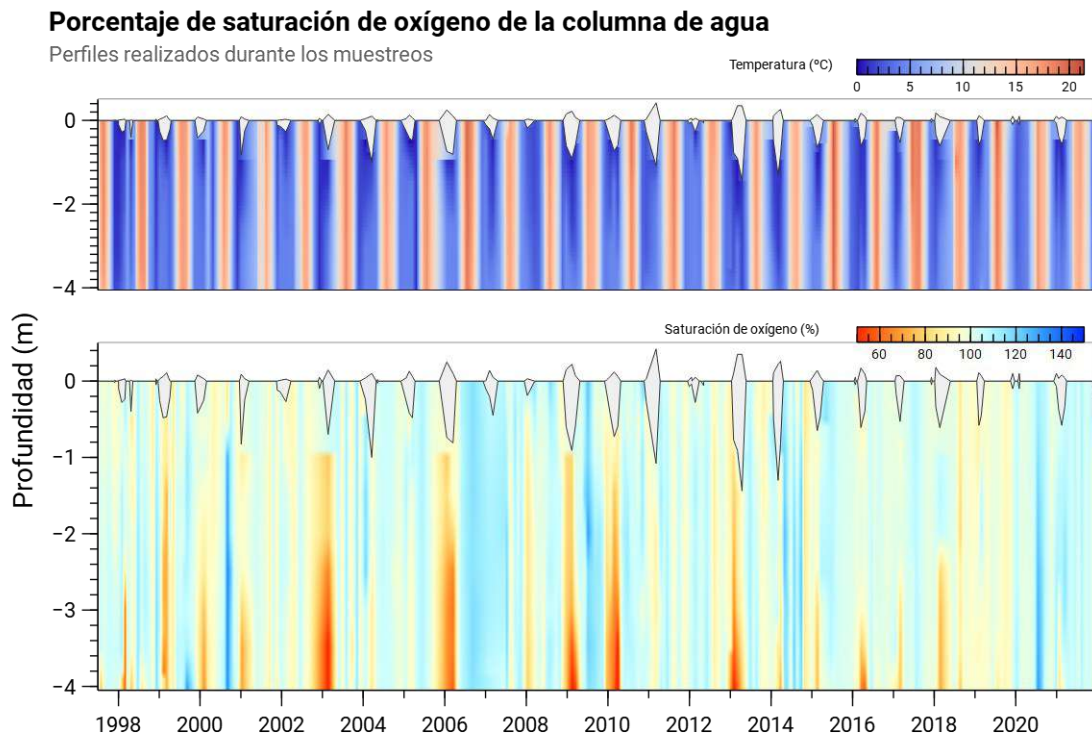


Figura 38. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1997-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

La Figura 39 muestra en detalle la saturación de oxígeno disuelto para el año hidrológico 2021. Aunque hay datos registrados hasta el mes de diciembre, se ha preferido no incluirlos en este informe para poder tratar conjuntamente todos los datos de la concentración de oxígeno debajo de la cubierta de hielo 2021-2022, al igual que se incluye aquí la del 2020-2021. En dicho período se observa el característico descenso del porcentaje de oxígeno debajo de la cubierta de hielo, aunque de poca intensidad.

Los niveles ligeramente superiores al 100% de saturación observados en agosto coinciden con una mayor estabilidad de la columna de agua (Figura 32) y una ligera reducción de la transparencia (Figura 34), por lo que podría estar relacionado con un incremento de la producción primaria fitoplanctónica.

### Porcentaje de saturación de oxígeno de la columna de agua - Año hidrológico 2021

Perfiles realizados durante los muestreos

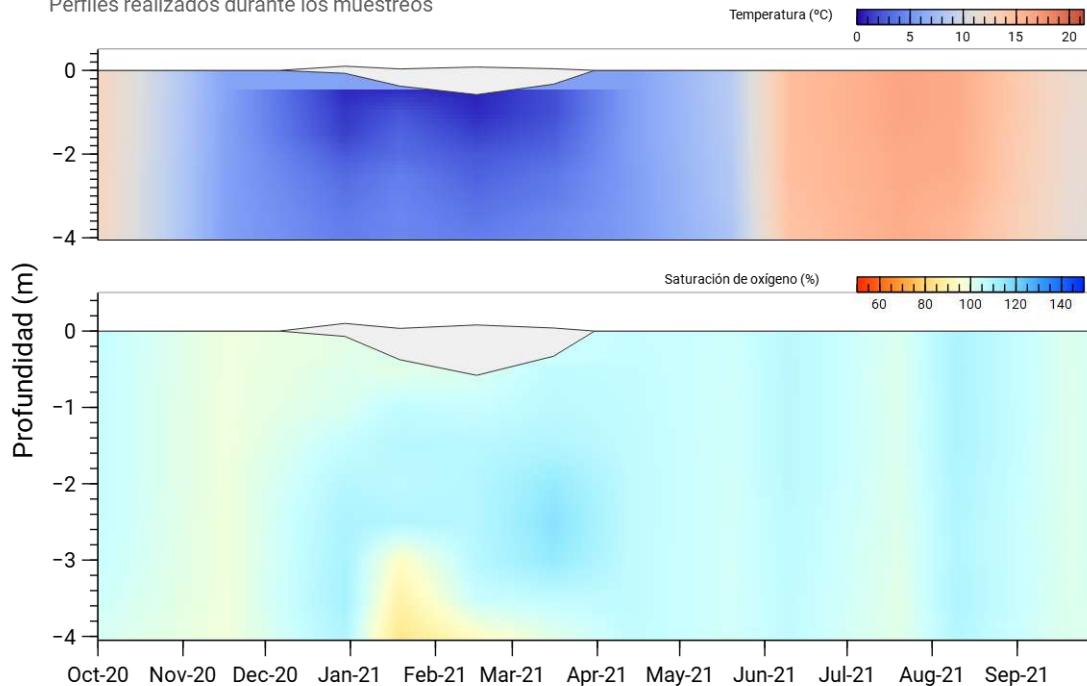


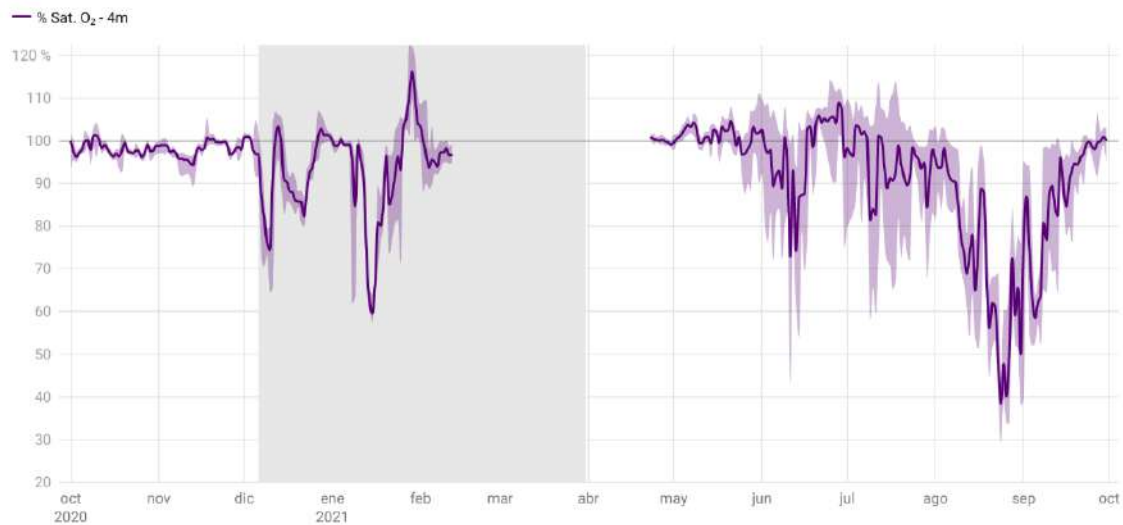
Figura 39. Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en la columna de agua de la laguna de Peñalara durante el año hidrológico 2021. Medidas discretas durante los muestreos.

Con una cadencia de muestreo mensual es muy posible que no se detecte alguna fluctuación a escala horaria o diaria en alguno de los parámetros de interés para conocer el estado hidrológico y ecológico de la laguna de Peñalara. Por ello, ya en informes anteriores (Granados, 2021) se presentaron los datos de saturación de oxígeno disuelto medidos en continuo con una sonda multiparamétrica (2016-2018) o con un sensor específico para el oxígeno disuelto (2020). En esta ocasión, la Figura 40 muestra la media y rango diario de la saturación de oxígeno a 4 m de profundidad durante el año hidrológico 2021.

Nuevamente se aprecia que la sonda en continuo es capaz de registrar sucesos y condiciones que no se llegan a detectar con una periodicidad mensual, aunque sí coinciden en el patrón general. Así, el descenso de la saturación de oxígeno a mediados de enero de 2021 se observó tanto en el perfil manual como en los datos de la sonda de oxígeno en continuo, pero por ejemplo con los muestreos mensuales no fue posible observar el fuerte ascenso registrado a principios de febrero. Más interesante es que la sonda de oxígeno en continuo registra un período más o menos prologado de déficit de saturación en fondo entre mediados de agosto y mediados de septiembre que es mucho menos aparente con los datos disponibles del muestreo mensual de esos meses. Como se ha comentado con anterioridad, coincide con el período de mayor estabilidad y menos transparencia.

## Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto - media diaria año hidrológico 2021

Sensor automático situado a 4 m en el punto de máxima profundidad.



El promedio diario se calcula a partir de las medidas quince-minutales. La banda morada indica el máximo y mínimo diario. Las áreas grises indican el período con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 40. Porcentaje medio diario de saturación de oxígeno disuelto en el fondo de la laguna de Peñalara durante el año hidrológico 2021. Medida en continuo con registrador automático de datos.

En el marco del *Plan de Actuación sobre Humedales Catalogados de la Comunidad de Madrid* (Comunidad de Madrid, 2020b), se ha procedido a profundizar en esta línea de automatización del registro de datos incluyendo un nuevo punto de medición con registrador automático de oxígeno en la superficie de la laguna.

Como ejemplo del grado de detalle que se alcanza con los sensores de oxígeno en continuo, se pueden destacar dos períodos a escala diaria bastante singulares: A) el detalle del proceso de consumo del oxígeno disuelto en el fondo de la laguna debajo de la cubierta de hielo (Figura 41a); y B) el detalle de la oscilación diaria de oxígeno disuelto en el fondo de la laguna durante el período central de verano (Figura 41b).

En el primer caso, en apenas dos días y medio el porcentaje de saturación de oxígeno en el fondo de la laguna desciende desde el 95% a valores cercanos al 60%, donde se estabiliza. En términos de concentración, esto supone un gradiente de agotamiento de  $O_2$  de  $-1.17 \text{ mg/l/d}$ , un valor bastante más alto del que se ha registrado en ocasiones anteriores en la Laguna de Peñalara. Este periodo coincidió con una meteorología relativamente estable, pero con temperaturas muy frías (Figura 5)

En el segundo caso, se trata de un período en el que se observa claramente el ciclo diario de concentración de oxígeno disuelto ligado a la producción primaria fitoplanctónica. A partir de las horas centrales del día y por la tarde, se produce una sobresaturación de oxígeno (producción)

mientras que a partir del anochecer desciendo (consumo) hasta las primeras horas de la mañana.

**A Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto - 12 al 15 de enero 2021**

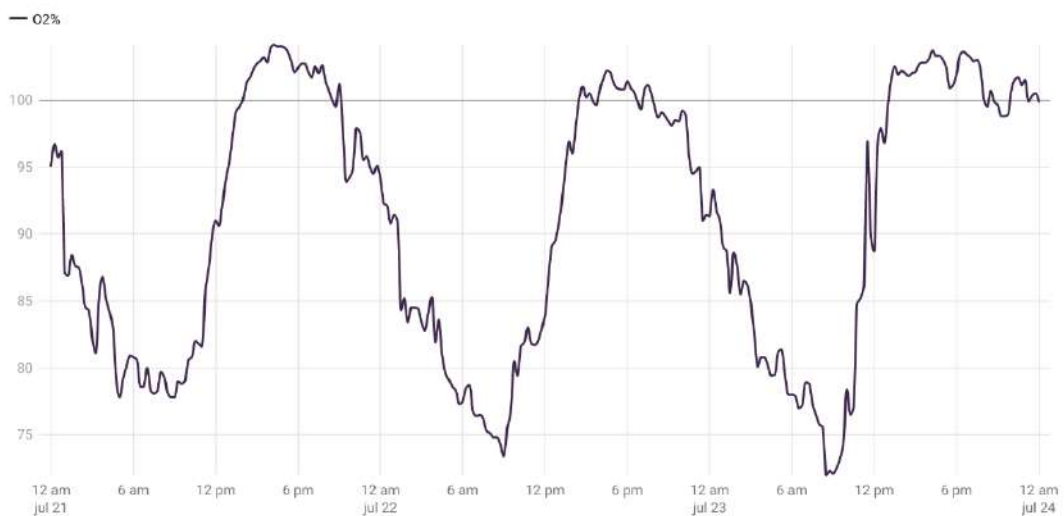
Sensor automático situado a 4 m en el punto de máxima profundidad.



Medidas quince-minutales. La hora está en UTC. Datos debajo de la cubierta de hielo.  
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

**B Porcentaje de saturación de oxígeno disuelto - 21 al 23 de julio 2021**

Sensor automático situado a 4 m en el punto de máxima profundidad.



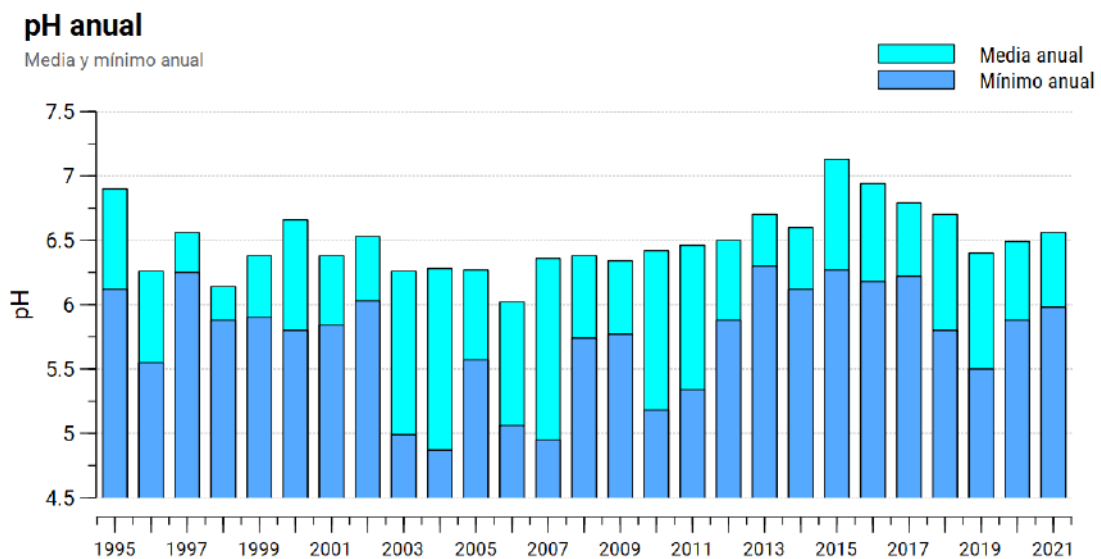
Medidas quince-minutales. La hora está en UTC.  
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 41. A) Detalle del proceso de consumo del oxígeno disuelto en el fondo de la laguna debajo de la cubierta de hielo. B) Detalle de la oscilación diaria de oxígeno disuelto en el fondo de la laguna durante el período central de verano.

## 4.7. pH

El pH es una medida de la concentración de hidrogeniones en el agua, es decir, una expresión de su grado de acidez (o alcalinidad). La alcalinidad media y mínima anual de la serie histórica se muestra en la Figura 42. A diferencia de otras variables, en esta ocasión se muestra el mínimo anual por ser el valor más relevante para determinar si se está produciendo un proceso de acidificación de la laguna, un problema generalmente derivado del depósito atmosférico de contaminantes ácidos.

Teniendo en cuenta toda la serie histórica (1995-2021), la laguna de Peñalara tiene un pH medio en superficie de 6.50, es decir, ligeramente ácido como consecuencia de la litología silíceosa de su cuenca. En ocasiones llega a alcanzar valores bastante bajos, especialmente en la época de deshielo: en más de dos tercios de los años el pH cae por debajo de 6.00. No obstante, en la época estival es raro observar valores tan bajos, por lo que realmente la laguna no está experimentando un proceso de acidificación, si no que se trata de episodios ácidos ligados a la entrada de iones ácidos procedentes de la fusión del manto nival durante la época de deshielo. En cualquier caso, como se comentará en el apartado 4.9 la laguna presenta un riesgo de consecuencia de su baja alcalinidad.



Fuente: CISE

Figura 42. pH medio y mínimo anual en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

Esto ha sido, entre otras razones, el motivo por el que en 2021 se ha instalado un colector de depósito atmosférico en el puerto de Los Cotos (Figura 43, depósito húmedo y seco). El dispositivo contribuirá además a detectar y cuantificar posibles procesos de eutrofización en la masa de agua. La instalación se ha realizado gracias al *Plan de Actuación sobre Humedales Catalogados de la Comunidad de Madrid* (Comunidad de Madrid, 2020b).





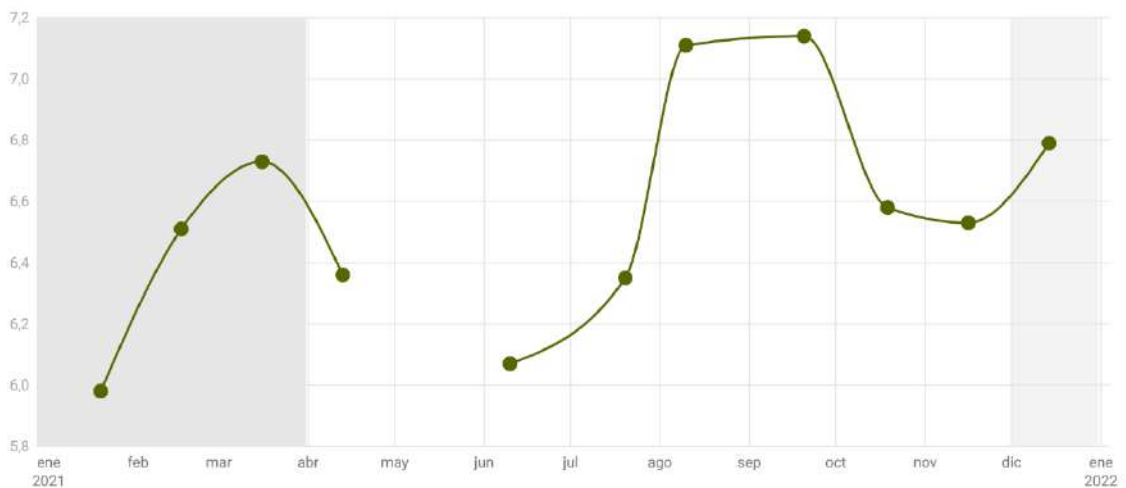
Figura 43. Colector de depósito atmosférico húmedo y seco instalado el puerto de Los Cotos.

La Figura 44 muestra la dinámica del pH durante 2021. Como se ha comentado, en este año también es apreciable un menor pH tras el deshielo de la laguna (sin ser el mínimo anual) y los valores máximos en la parte central del verano. Por razones técnicas, no se ha podido obtener el pH en el agua de fondo.

### pH 2021

pH en superficie

0.5 m



El pH es un indicador de los iones hidrógeno presentes en el agua, y es una medida del grado de acidez (o alcalinidad) del agua. Se obtiene realizando un perfil con sonda multiparamétrica durante las campañas de muestreo mensuales. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación · Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama · Creado con Datawrapper

Figura 44. pH en superficie de la laguna de Peñalara durante 2021. Medidas discretas durante los muestreos.



#### 4.8. Conductividad

La conductividad eléctrica del agua es una medida sencilla y rápida para determinar el grado de mineralización o contenido en iones disueltos. La Figura 45 muestra la evolución de este parámetro entre 2001 y 2021, período para el que se dispone de datos de toda la columna de agua. La Figura 46 muestra con mayor detalle el año hidrológico 2021.

La conductividad sigue un patrón anual bastante marcado, aunque presenta diferencias entre la superficie y el fondo de la laguna. En verano (jul-sep) la media de conductividad es de 13.19  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en superficie y de 13.52  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el fondo de la laguna (con máximos de 20.3 y 30.2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente). Suele coincidir con el período de nivel del agua más bajo (Figura 20, Figura 23) y menor tasa de renovación (Figura 24). Por lo general no suele haber grandes diferencias entre la superficie y el fondo de la laguna. Por el contrario, debajo de la cubierta de hielo suele producirse una asimetría entre el agua inmediatamente debajo de la cubierta de hielo y la que está en las cercanías del sedimento. Así, la media de conductividad (ene-mar) es de 7.92  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en superficie y de 16.62  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el fondo de la laguna (con máximos de 20.0 y 29.7  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente). Cuando la cubierta de hielo es lo suficientemente potente y perdurable para impedir la llegada de luz y empieza a producirse la degradación de materia orgánica, la conductividad cerca del fondo se incrementa. De hecho, llegan a alcanzarse valores más altos que los observados durante los meses de verano.

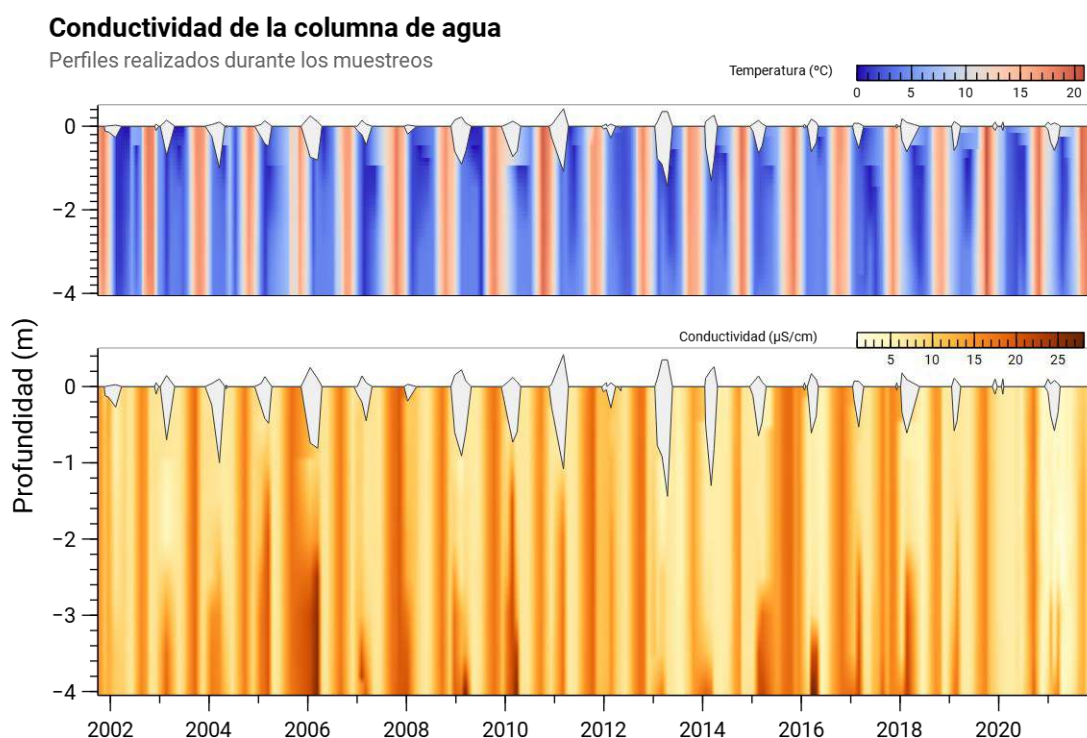


Figura 45. Conductividad en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1997-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

### Conductividad de la columna de agua - Año hidrológico 2021

Perfiles realizados durante los muestreos

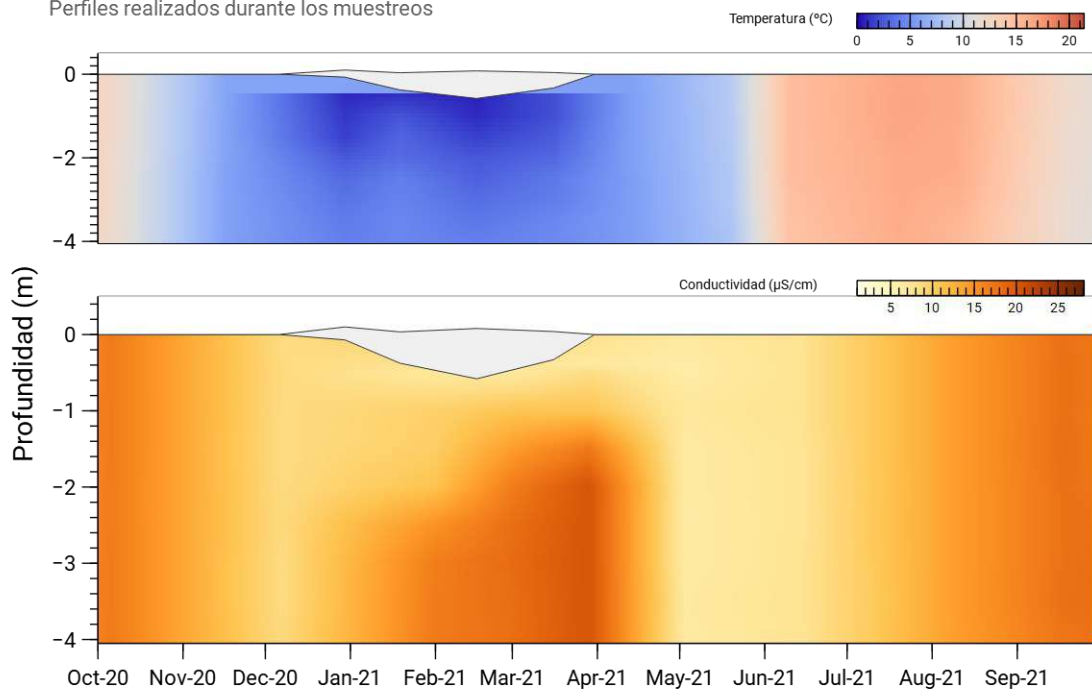
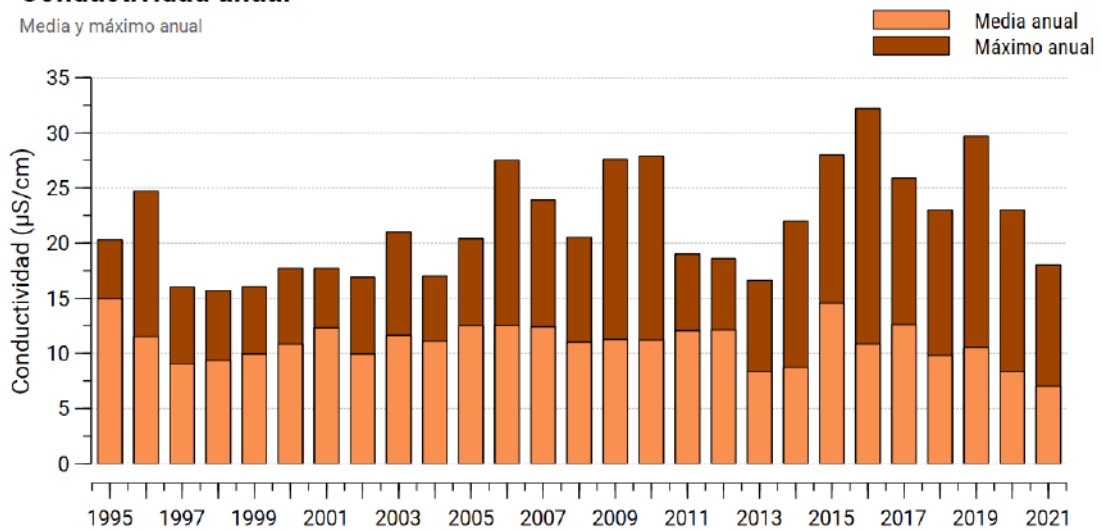


Figura 46. Conductividad en la columna de agua de la laguna de Peñalara durante el año hidrológico 2021. Medidas discretas durante los muestreos.

La Figura 47 muestra la conductividad media y el máximo anual de toda la columna de agua.

### Conductividad anual

Media y máximo anual



Fuente: CISE

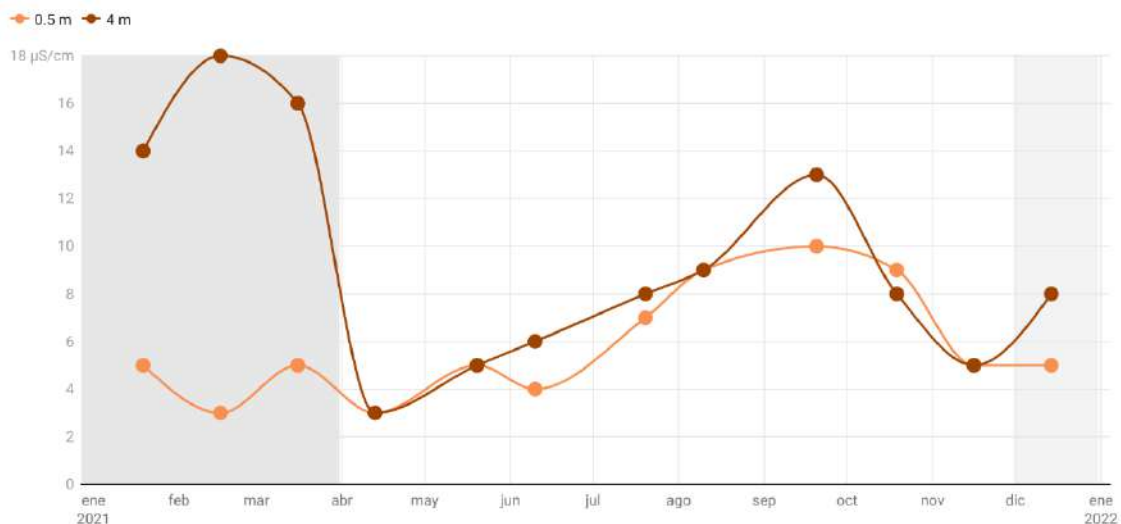
Figura 47. Conductividad media y máxima anual en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

Así, teniendo en cuenta toda la serie histórica (1995-2021), la laguna de Peñalara tiene una conductividad media de 10.94  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 47). Merece la pena destacar que en cualquier caso se trata de valores extremadamente bajos (como es habitual en lagos de montaña sobre sustratos silíceos), llegando en las épocas de deshielo a estar por debajo de los 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La Figura 48 muestra la evolución temporal de la conductividad en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021. Como se ha visto en anteriores ocasiones, bajo la cubierta de hielo de 2020-2021 también se produjo un incremento de la conductividad en el agua de fondo claramente observable durante tres meses seguidos. Posteriormente, la homogeneización de la columna de agua por el deshielo hizo que la conductividad descendiera a niveles bastante bajos, y ha permanecido en niveles relativamente bajos durante el resto del año. De hecho, este 2021 ha tenido el promedio anual mínimo (7.03  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de toda la serie disponible.

### Conductividad 2021

Conductividad eléctrica corregida a 25°C en superficie y fondo



La conductividad eléctrica es una estimación de la cantidad de iones disueltos en el agua y se obtiene realizando un perfil con sonda multiparamétrica durante las campañas de muestreo mensuales. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.  
Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

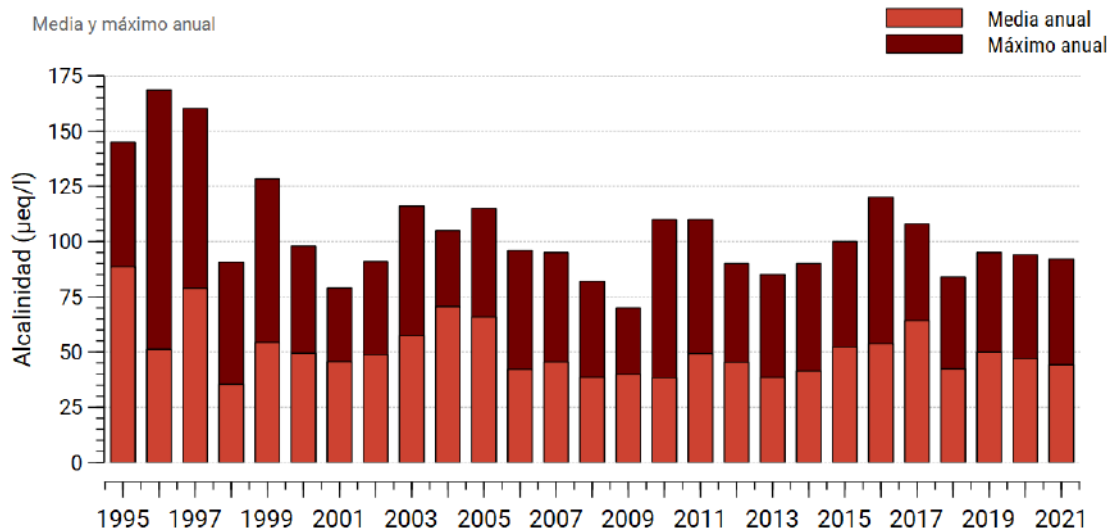
Figura 48. Conductividad en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021. Medidas discretas durante los muestreos.

### 4.9. Alcalinidad, calcio y magnesio

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón de un agua, es decir, de su resistencia a cambiar de pH por medio de la neutralización de las entradas de ácidos. En este tipo de aguas, la inmensa mayoría de la capacidad tampón se debe al sistema carbónico-carbonatos. La alcalinidad media y máxima anual de la serie histórica se muestra en la Figura 49, y el detalle de la de 2021 en la Figura 50.

## Alcalinidad anual

Media y máximo anual



Fuente: CISE

Figura 49. Alcalinidad media y máxima anual en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

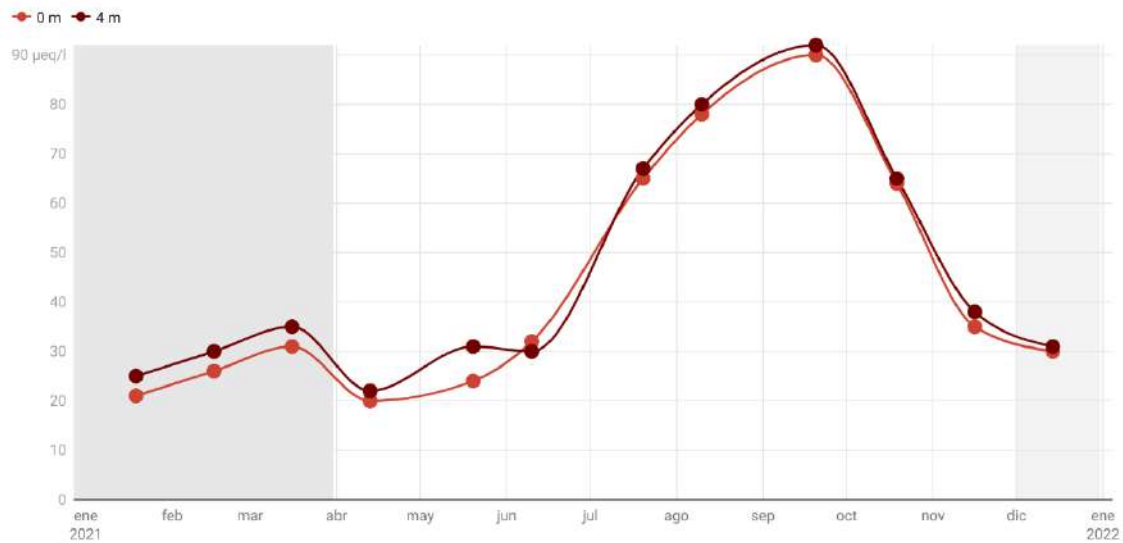
La alcalinidad media de la laguna es de 51.1 µeq/l en la serie histórica, y generalmente se suele considerar como riesgo de acidificación cuando la alcalinidad se sitúa por debajo de los 50 µeq/l. Por ello, la laguna de Peñalara puede considerarse como particularmente frágil frente a la acidificación al menos fuera del período estival. Como se ha comentado anteriormente, en 2021 se ha instalado un colector de depósito atmosférico en el puerto de Los Cotos (deposito húmedo y seco) que contribuirá también a detectar y cuantificar posibles procesos de eutrofización en la masa de agua. La instalación se ha realizado gracias al *Plan de Actuación sobre Humedales Catalogados de la Comunidad de Madrid* (Comunidad de Madrid, 2020b).

En general, la alcalinidad sigue un patrón similar al de la conductividad: es más alta en la parte central o final del verano y disminuye tanto en primavera (deshielo) como en otoño (generalmente incremento de precipitación). En cuanto al gradiente vertical, apenas suele haber diferencias entre el agua de superficie y la de fondo, si bien suele ser algo más alta en la zona más profunda. Como puede verse en la Figura 50, en 2021 este patrón es claramente reconocible. En 2021 la alcalinidad media ha sido de 44.2 µeq/l.

Como ya se comentó en el informe respecto al 2019-2020 (Granados, 2021), buena parte de la alcalinidad, y por tanto de la resistencia de la laguna frente a la acidificación, se genera en episodios de intrusión de polvo sahariano. A fecha de la redacción de este informe todavía no estaba publicado el informe de calidad del aire que recoge los episodios observados durante 2021.

## Alcalinidad 2021

Alcalinidad en superficie y fondo



La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del agua. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 50. Alcalinidad en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.

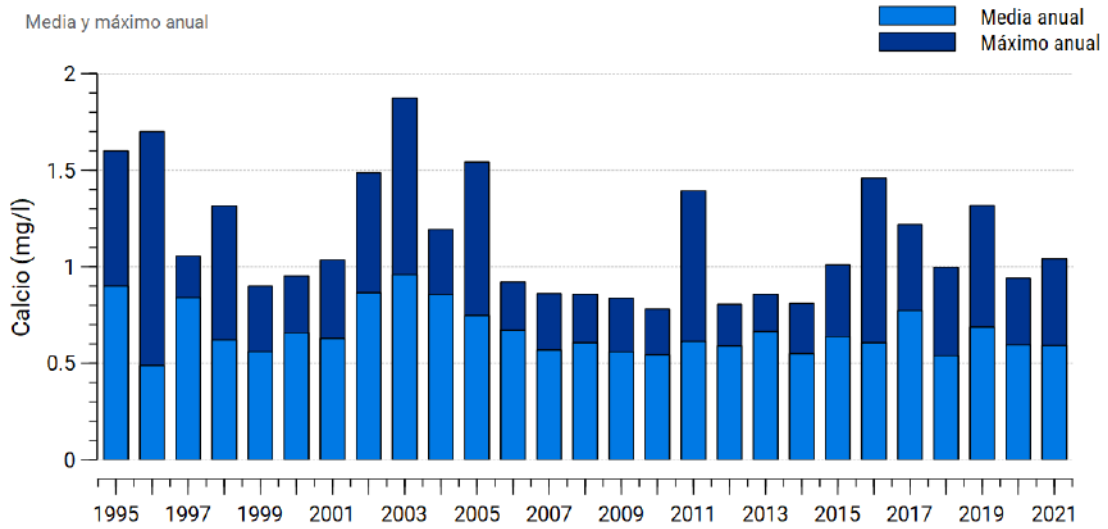
El análisis completo de todos los aniones y cationes presentes en el agua sólo se ha podido abordar durante períodos puntuales de tiempo (Granados et al., 2006). Sin embargo, sí se dispone de la serie completa de la concentración de calcio y magnesio. La Figura 51 y la Figura 52 muestran respectivamente la concentración máxima y media anual del calcio y del magnesio en el agua de la laguna entre 1995 y 2021. La concentración media de calcio de toda la serie es 0.66 mg/l y la de magnesio de 0.19 mg/l.

La Figura 53 y la Figura 54 muestran la evolución mensual de la concentración de calcio y magnesio correspondiente al año 2021. La concentración media en 2021 ha sido 0.59 mg/l y 0.17 mg/l respectivamente.

Ambos cationes recuerdan también al comportamiento de la conductividad, dado que esta última es consecuencia de la presencia de iones en el agua, aunque debajo de la cubierta de hielo la conductividad se muestra más constante en valores altos que la concentración de calcio y magnesio. Mientras que los valores máximos de conductividad aparecen debajo de la cubierta de hielo en fondo (Figura 48), los valores máximos de calcio y magnesio se dan en la parte central o final del verano, en condiciones de aguas bajas (Figura 23) y bajo porcentaje de renovación (Figura 24). Ambos cationes presentan un comportamiento prácticamente idéntico en 2021, y que también es similar al de la alcalinidad salvo en la capa de agua más profunda debajo de la cubierta de hielo (Figura 50). Las diferencias observadas respecto a la concentración de alcalinidad (y la conductividad) se deben muy probablemente a que no se está teniendo en cuenta aquí la presencia del cloruro, sulfato, potasio y del sodio presente en el agua.

### Calcio anual

Media y máximo anual

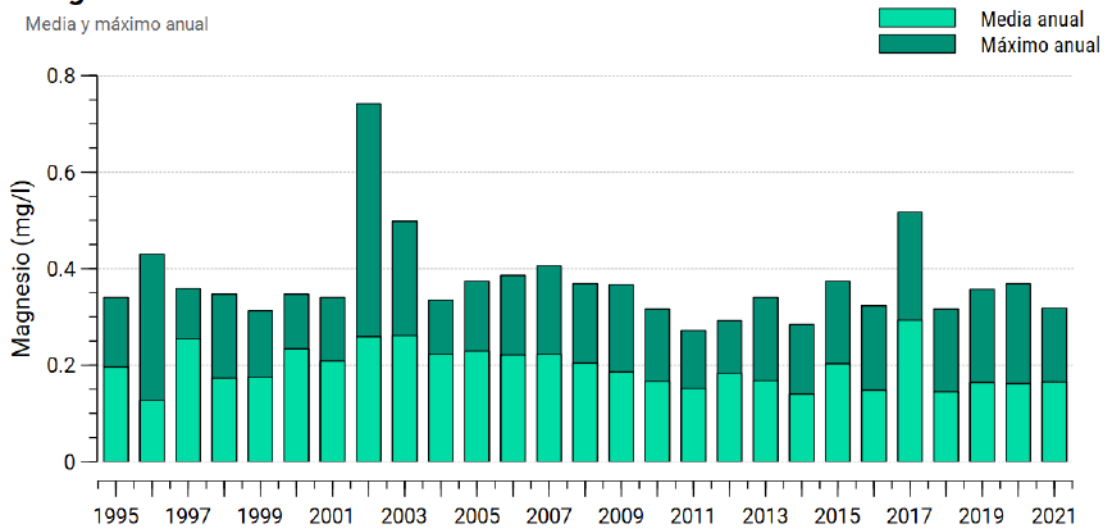


Fuente: CISE

Figura 51. Concentración media y máxima anual de calcio en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

### Magnesio anual

Media y máximo anual

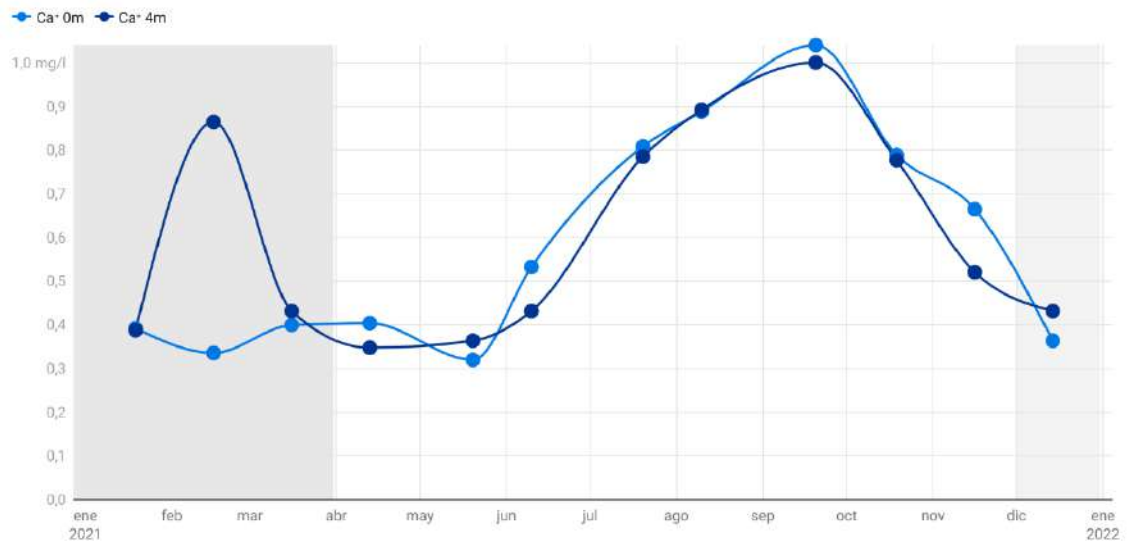


Fuente: CISE

Figura 52. Concentración media y máxima anual de calcio en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

### Calcio 2021

Concentración de calcio en superficie y fondo



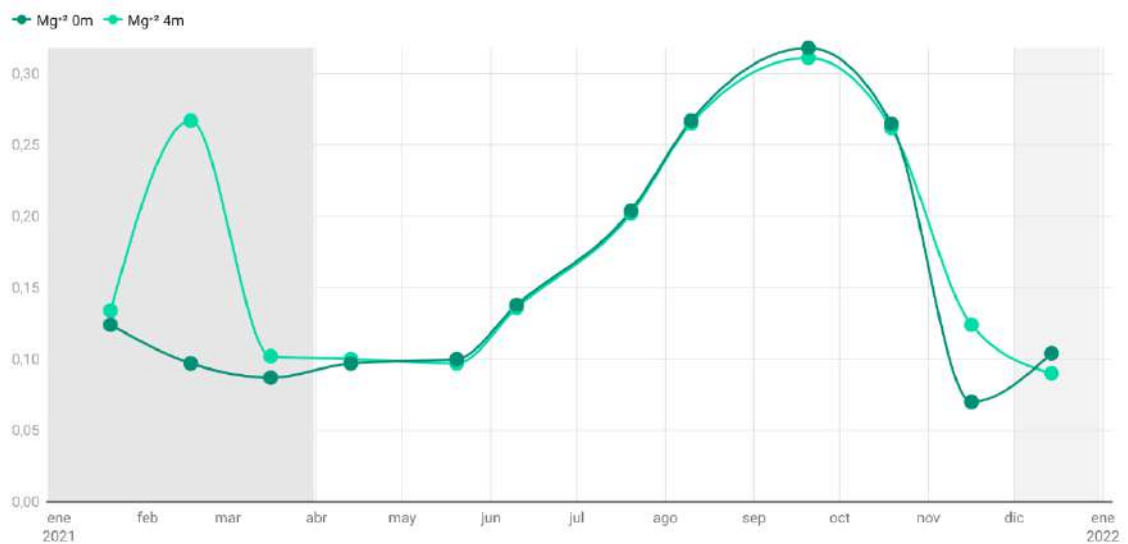
Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 53. Calcio en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.

### Magnesio 2021

Concentración de calcio en superficie y fondo



Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 54. Magnesio en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.

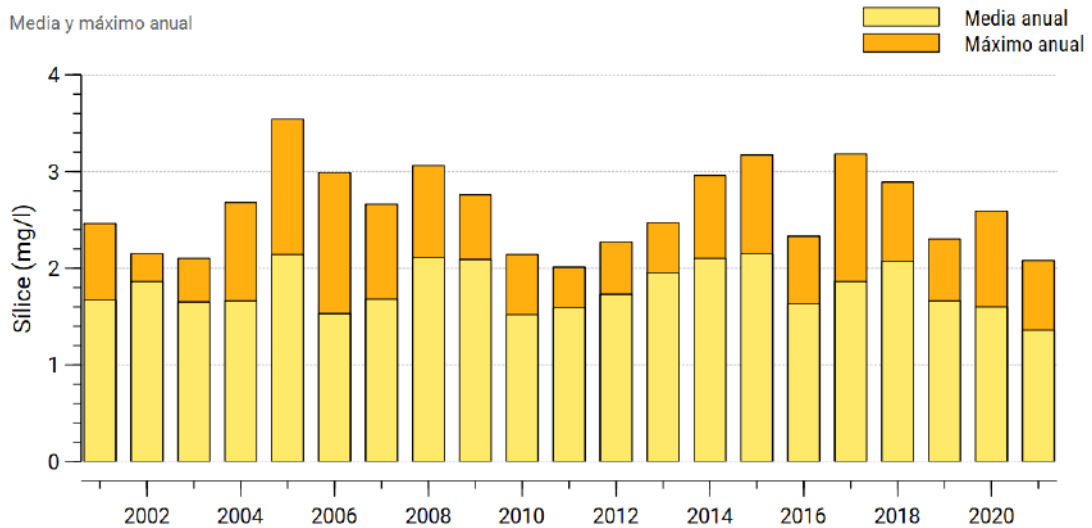


#### 4.10. Sílice

La Figura 55 muestra la concentración media y máxima anual de la serie histórica de sílice y la Figura 56 la evolución mensual de la concentración para el año 2021

##### Sílice anual

Media y máximo anual



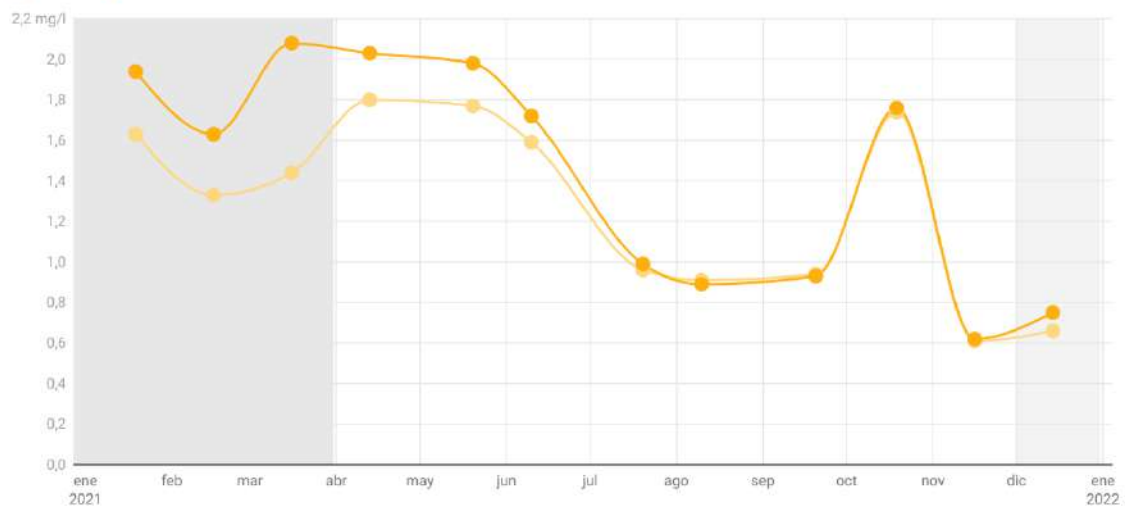
Fuente: CISE

Figura 55. Concentración media y máxima anual de sílice en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 2001-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

##### Sílice 2021

Concentración de calcio en superficie y fondo

SiO<sub>2</sub> 0m SiO<sub>2</sub> 4m



Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 56. Sílice en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.

La concentración media de sílice en 2021 fue de 1.36 mg/l, algo inferior a la media de la serie histórica (1.79 mg/l). La sílice es fundamental para la formación de las valvas de las diatomeas, por lo que es frecuente que la concentración disminuya en los meses de mayor producción primaria en la laguna.

#### 4.11. Nutrientes

Aparte de las limitaciones en cuanto a iluminación de la columna de agua (apartado 4.5), para el crecimiento fitoplanctónico es determinante la concentración de nutrientes en la columna de agua, fundamentalmente nitrógeno y fósforo.

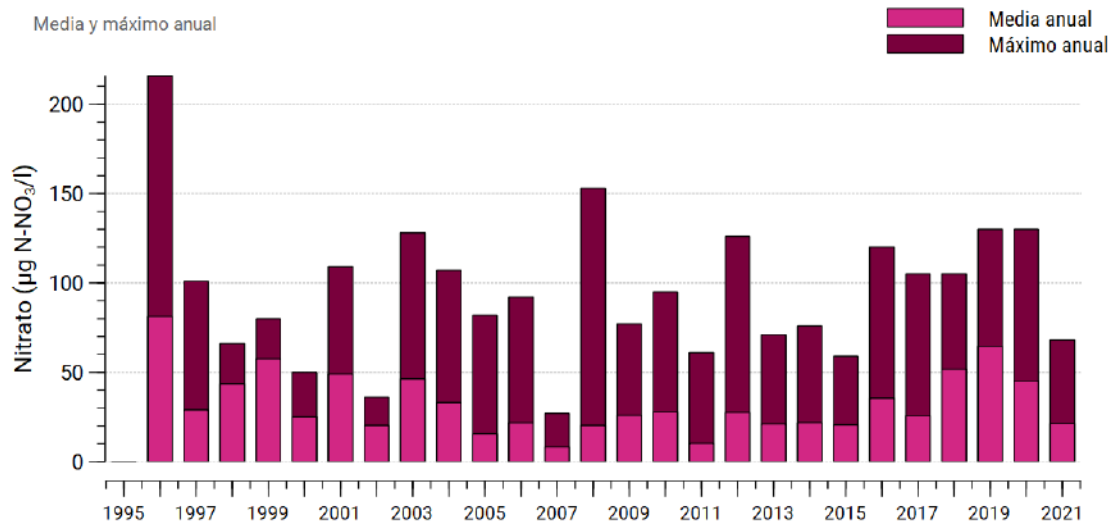
Para el nitrógeno se muestra la Figura 57 y la Figura 58 con la evolución de la concentración media y máxima anual de nitrato y la de amonio respectivamente, a lo largo del seguimiento limnológico mensual. Al igual que con otras variables, se presenta también la evolución mensual durante 2021 (Figura 59 y Figura 60 respectivamente). En cuanto a la serie histórica, la concentración media de nitrato en la laguna se sitúa en 32.7  $\mu\text{g N-NO}_3/\text{l}$  y la de amonio en 18.9  $\mu\text{g N-NO}_3/\text{l}$ . En cuanto a los niveles máximos, se han obtenido 216  $\mu\text{g N-NO}_3/\text{l}$  y 126  $\mu\text{g N-NH}_4^+/\text{l}$  respectivamente. En cualquier caso, hay que destacar que se trata de concentraciones bajas, aunque puntualmente el amonio puede presentar valores relativamente importantes. No se presentan gráficas sobre la concentración de nitrito dado que durante este período siempre ha estado por debajo de los 7  $\mu\text{g/l}$  (media de 1.6  $\mu\text{g/l}$ ), por lo que sencillamente consideramos que, aparte de no constituir un posible reservorio de nitrógeno, es un buen indicador de que no hay procesos relevantes de contaminación.

La dinámica del nitrógeno es más complicada que la que se ha presentado para la alcalinidad o los cationes. En este caso, además de estar en concentraciones bastante más bajas, está implicado en diversos procesos biológicos que determinan su concentración en la columna de agua. Así, la producción primaria de materia orgánica supone un secuestro del nitrógeno disuelto (generalmente en forma de nitrato), mientras que los procesos catabólicos pueden incrementar la concentración de nitrógeno disuelto (generalmente en forma de amonio). Además, el nitrógeno puede tener una vía de entrada muy importante como depósito atmosférico. Ya se ha comentado anteriormente que la instalación de un colector de depósito húmedo y seco en el puerto de los Cotos en 2021 contribuirá a conocer mejor su origen y dinámica temporal.

Es frecuente observar valores más altos de nitrato cuando la laguna presenta una menor tasa de renovación en los meses estivales, pero en muchas ocasiones se ven importantes descensos en este período tal como ha ocurrido en 2021 (Figura 59) probablemente debido al consumo durante la producción primaria fotosintética en ausencia de entradas importantes. En cuanto al amonio, también presenta una dinámica compleja, con un comportamiento algo fluctuante y distinto entre superficie y fondo a lo largo del 2021 sin que esté clara una única causa que pueda explicar este comportamiento.

### Nitrato anual

Media y máximo anual

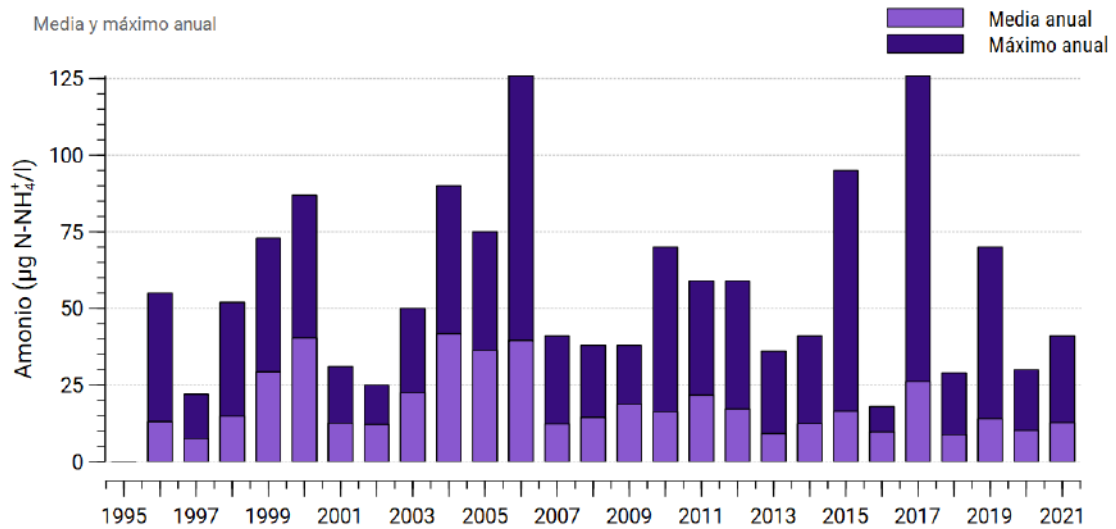


Fuente: CISE

Figura 57. Concentración media y máxima anual de nitrato en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1996-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

### Amonio anual

Media y máximo anual

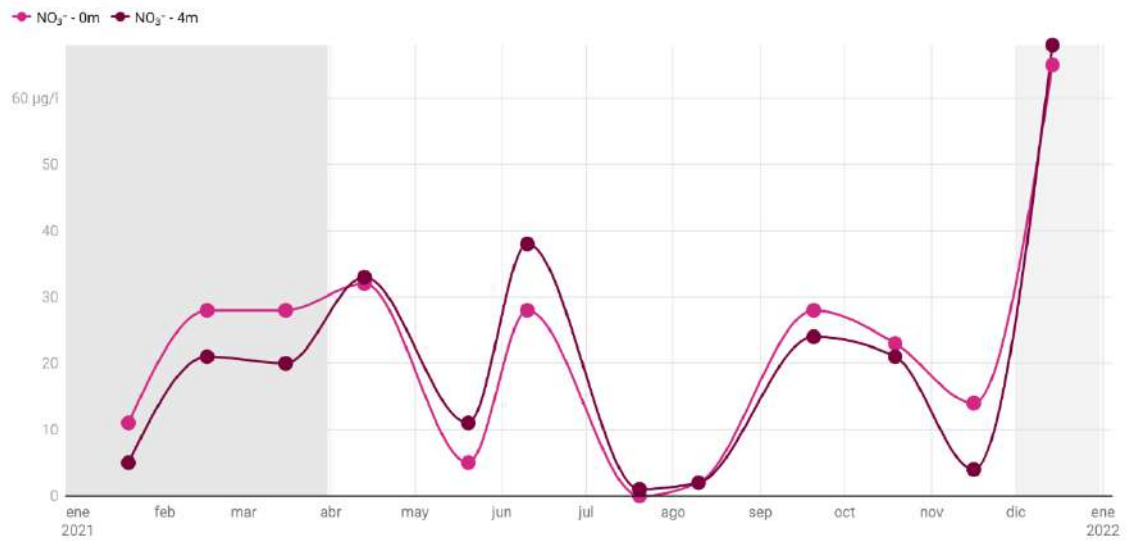


Fuente: CISE

Figura 58. Concentración media y máxima anual de amonio en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1996-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

## Nitrato 2021

Concentración de nitrato en superficie y fondo



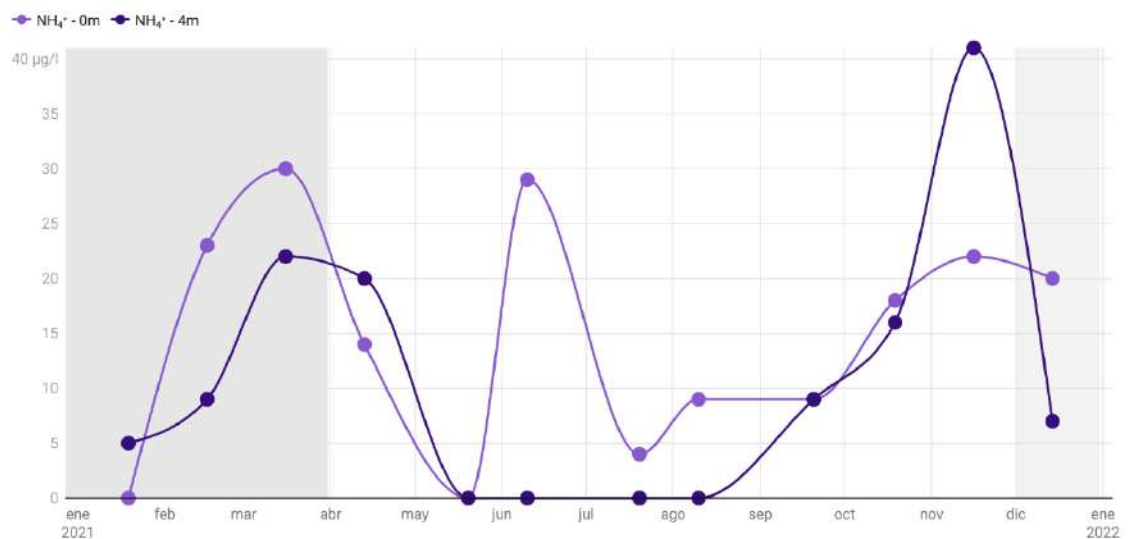
Nitrato en forma de  $N-NO_3^-$ . Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 59. Nitrato en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.

## Amonio 2021

Concentración de amonio en superficie y fondo



Amonio en forma de  $N-NH_4^+$ . Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 60. Amonio en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.

En cuanto al fósforo, la Figura 61 presenta la evolución anual entre 1995- 2021. Dado que el fósforo total es un parámetro clave en el proceso de eutrofización, en esta ocasión la gráfica muestra la concentración media anual, la máxima anual y la máxima estival, ya que los episodios crónicos de eutrofización de principios de los 90 se producían en la época estival (Granados et al., 2006). La media de fósforo total a lo largo de los años estudiados ha sido de 17.8  $\mu\text{g P-PO}_4/\text{l}$ , aunque como se puede ver con importantes incrementos puntuales. Es importante destacar que los mayores máximos anuales que se muestran se producen en realidad en la capa de agua de fondo debajo de la cubierta, mientras que la máxima concentración estival encontrada estos años ha sido de 75  $\mu\text{g P-PO}_4/\text{l}$ . Así, aunque determinados años presenta niveles de fósforo estival relativamente altos, la situación no es comparable con los episodios crónicos comentados anteriormente.

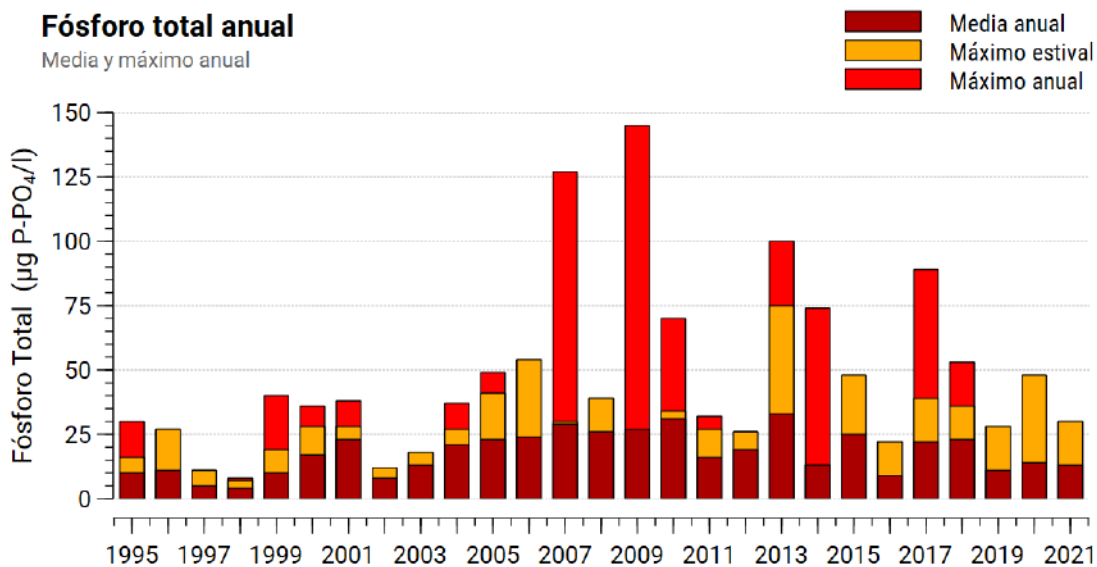


Figura 61. Concentración media y máxima anual de fósforo total en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

Además, hay que señalar que la concentración de fósforo reactivo soluble es casi siempre extremadamente baja y muy próxima al límite de detección, por lo que muy probablemente el crecimiento fitoplanctónico se encuentra limitado por fósforo y no por nitrógeno.

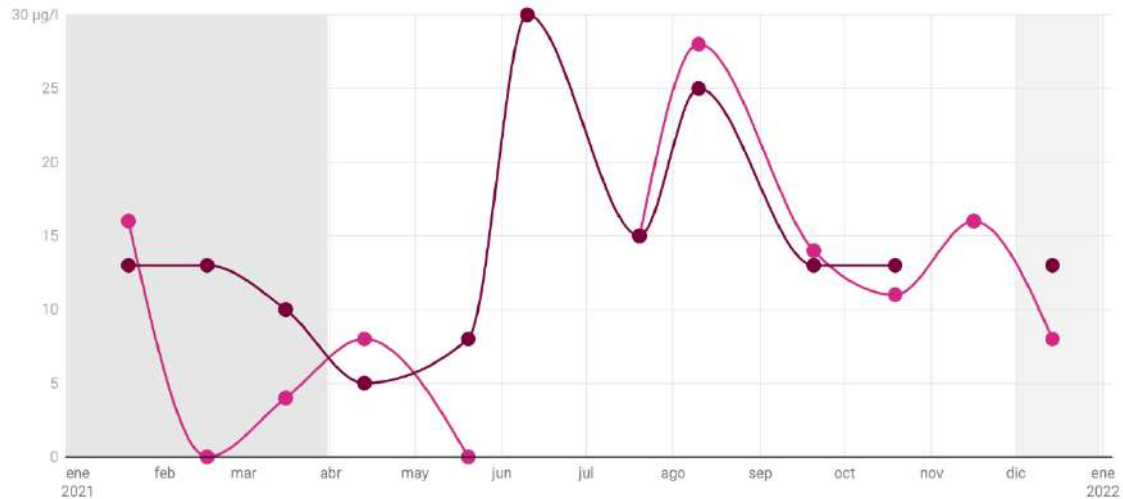
El origen del fósforo en las cuencas de lagos y lagunas de alta montaña suele ser atmosférico, aunque en el caso de Peñalara tampoco es despreciable el efecto de la presencia de ganado y, últimamente, cabra montés en la cuenca de la laguna. Por ello, nuevamente hay que hacer referencia al colector de depósito atmosférico húmedo y seco instalado en el Puerto de los Cotos en 2021 en el marco del *Plan de Actuación sobre Humedales Catalogados de la Comunidad de Madrid* (Comunidad de Madrid, 2020b). Como se ha comentado, este equipo permitirá cuantificar con mayor detalle las entradas de nutrientes vía depósito atmosférico y el estudio de la posible eutrofización y producción primaria de la laguna.

La evolución de la concentración del fósforo total en 2021 se muestra en la Figura 62.

### Fósforo total 2021

Concentración de fósforo reactivo soluble en superficie y fondo

•  $\mu\text{g P-PO}_4/\text{l} - 0\text{m}$  •  $\mu\text{g P-PO}_4/\text{l} - 4\text{m}$



Fósforo total en forma de ortofosfato P-PO<sub>4</sub>. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 62. Fósforo total en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.

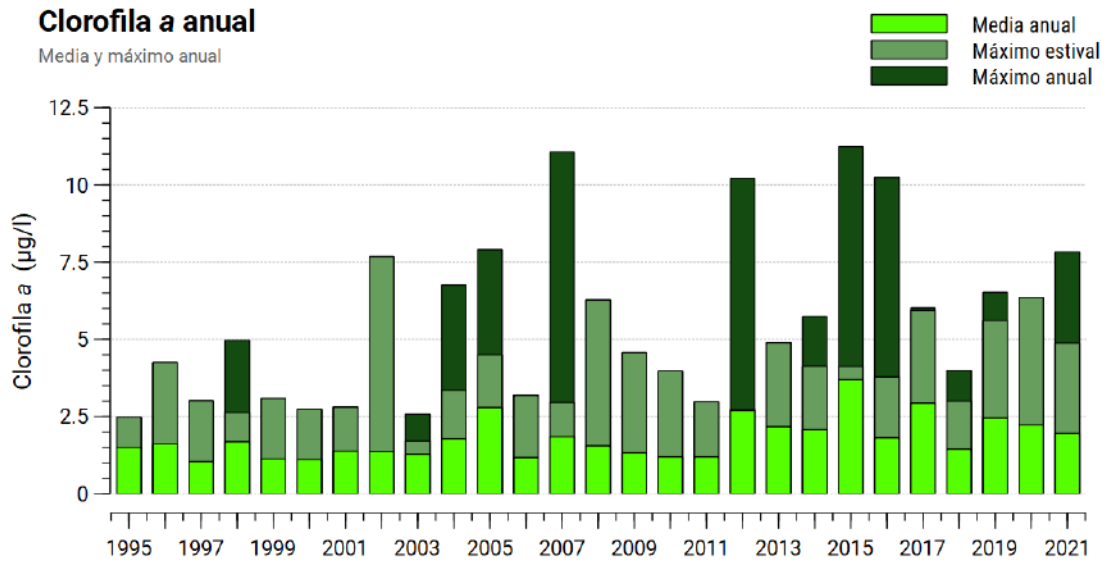
Al igual que con las formas de nitrógeno, la concentración de fósforo también está influenciada por las entradas desde la atmósfera y la cuenca y los procesos de producción y degradación de materia orgánica, por lo que a menudo presenta una evolución anual algo fluctuante. Normalmente se observan valores más elevados en la parte central del verano (como en 2021), exceptuando como se ha comentado anteriormente determinados episodios con fósforo total bastante elevado en el agua más profunda debajo de la cubierta de hielo.

#### 4.12. Pigmentos fotosintéticos

Para terminar con las características físico-químicas de la laguna de Peñalara, se representa en la Figura 63 la concentración anual de clorofila *a* durante el seguimiento limnológico mensual. Nuevamente, al tratarse de un parámetro clave en determinar la eutrofización al tratarse de una aproximación a la abundancia de productores primarios fotosintéticos, se muestra la concentración media anual, así como la máxima anual y estival. La media anual de la serie es de 1.79  $\mu\text{g/l}$ . Casi siempre, los máximos anuales de clorofila *a* en la superficie de la laguna de Peñalara se producen en mitad o finales de verano. En estas épocas apenas se encuentran diferencias notables en la concentración de clorofila *a* entre la superficie y el fondo de la laguna. Por el contrario, son relativamente frecuentes los incrementos de concentración de clorofila *a* en el fondo de la laguna de Peñalara durante la cubierta de hielo, y de hecho nuevamente se observa que en varias ocasiones el máximo anual no se produce en los meses estivales. En estos



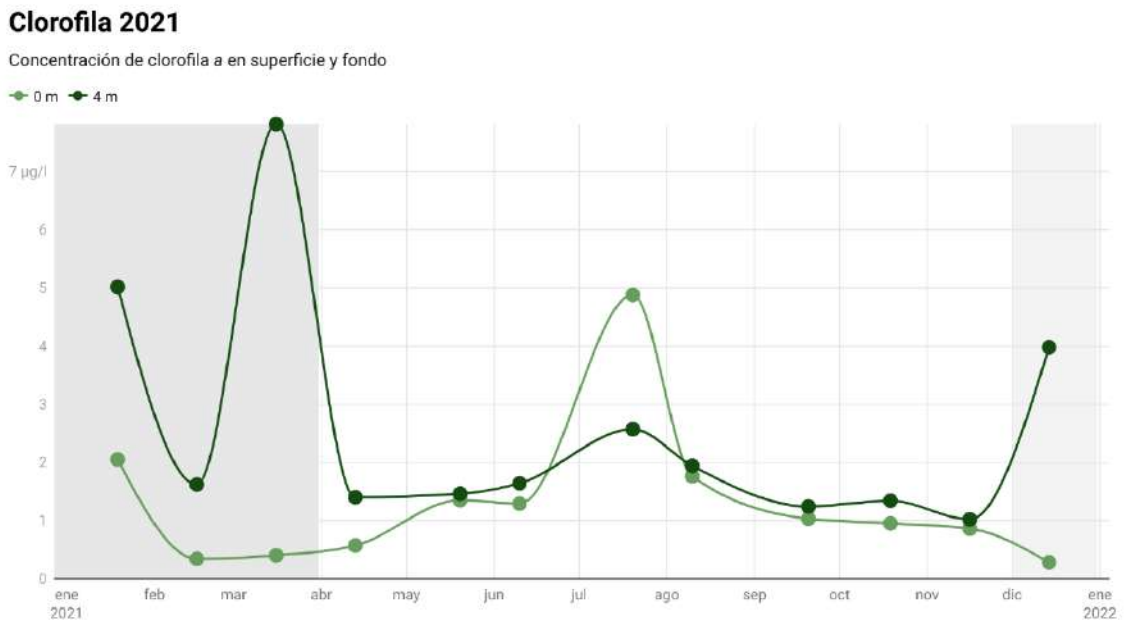
casos, con gran probabilidad la clorofila procede de las algas senescentes que se van acumulando en el fondo de la laguna al quedar la columna de agua en relativa oscuridad.



Fuente: CISE

Figura 63. Concentración media y máxima anual de clorofila  $a$  en la columna de agua de la laguna de Peñalara entre 1995-2021. Basado en medidas discretas durante los muestreos.

La Figura 64 muestra el detalle de la evolución mensual durante 2021.



La concentración de clorofila  $a$  es una aproximación a la abundancia de productores primarios fotosintéticos. Las áreas grises indican el periodo con cubierta de hielo.

Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper

Figura 64. Clorofila  $a$  en superficie y fondo de la laguna de Peñalara durante 2021.

En 2021 se muestra claramente lo que se ha comentado respecto a los máximos anuales debajo de la cubierta de hielo, con el máximo anual en el fondo de la laguna en el mes de marzo, coincidente con la época de mayor espesor de hielo de la laguna (Figura 18). Probablemente se debía a una mayor acumulación de algas senescentes en fondo, proceso comentado anteriormente. También parece apuntarse el mismo proceso al comienzo de la cubierta de hielo 2021-2022. El máximo estival se produjo en julio (4.88  $\mu\text{g/l}$ ), y de forma poco habitual la concentración de pigmentos fue casi el doble en superficie que en fondo. Quizá tenga relación con la mayor estabilidad de la columna de agua que parece observarse en los últimos años (Figura 33), aunque será necesario corroborarlo en el futuro.

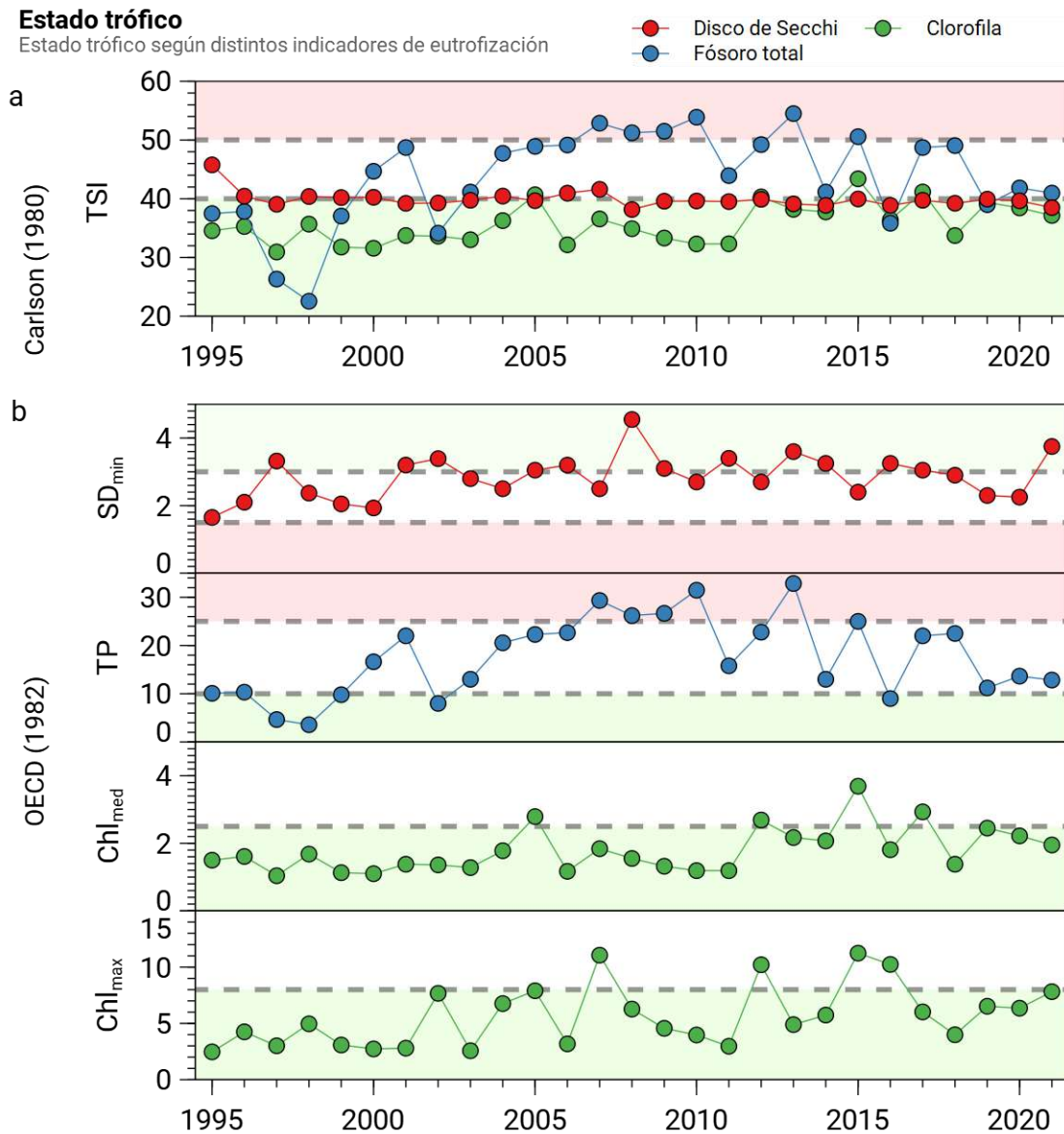
#### 4.13. Estado trófico y tendencia

La eutrofización de los ecosistemas acuáticos es un problema que se estudiando desde hace décadas y la bibliografía al respecto es amplísima (Ansari et al., 2011). Como consecuencia de ello se han desarrollado multitud de índices y métodos para establecer el estado trófico de los ecosistemas acuáticos, pero ninguno de ellos permite su aplicación general a diferentes tipos de ecosistemas ni tienen el mismo consenso sobre su uso en la comunidad científica (Zhang et al., 2021). A pesar de esta limitaciones, dos de los índices más utilizados en lagos y lagunas son el TSI (Carlson, 1977) y el de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 1982). La Figura 65 muestra la evolución anual del estado trófico de la laguna de Peñalara de acuerdo con estos dos sistemas de clasificación.

Como puede apreciarse, con estos dos sistemas la clasificación el estado trófico varía en función de qué variable se examine. Según el TSI (Figura 65a), conforme a la clorofila media anual la laguna tendría habitualmente un estado oligotrófico y ocasionalmente entraría en la mesotrofia. Sin embargo, atendiendo al fósforo total promedio la laguna varía desde condiciones oligotróficas a eutróficas, predominando los años clasificados como mesotróficos. Por último, la profundidad promedio del disco de Secchi indicaría que la laguna casi siempre está cerca del umbral entre oligotrofia y mesotrofia. Sin embargo, esta última variable está claramente distorsionada por la profundidad mínima de la propia laguna, que limita la profundidad a la que podría llegar a verse el disco de Secchi. En la clasificación alternativa (Figura 65b) se ha empleado el mínimo de profundidad de Secchi anual, y también sugiere que la laguna alterna entre situaciones oligotróficas y mesotróficas. Con esta clasificación tanto la concentración media de fósforo como la media y el máximo de clorofila indican aproximadamente los mismos niveles tróficos que con el TSI. En el caso del fósforo, hay un comportamiento muy fluctuante, mientras que la clorofila permanece de manera mucho más constante en niveles oligotróficos.

En definitiva, tanto la transparencia como los niveles de pigmentos fotosintéticos coinciden en que la laguna de Peñalara es generalmente oligotrófica, pero tendiendo a las condiciones mesotróficas. Sin embargo, el fósforo total indicaría unas condiciones tróficas más elevadas, llegando en ocasiones a la eutrofia. En este sentido, ya se ha comentado en el apartado 4.11 que los máximos anuales de fósforo en numerosas ocasiones veces se producen debajo de la

cubierta de hielo en las cercanías del sedimento y por tanto no estarían contribuyendo directamente a la producción primaria y serían más bien una consecuencia de la degradación de materia orgánica en condiciones de oscuridad. Además, son especialmente relevantes los niveles de clorofila, ya que es una estimación mucho más directa de la biomasa algal que la transparencia o el contenido de fósforo, por lo que su consideración como laguna (meso)oligotrófica parece mucho más adecuada.

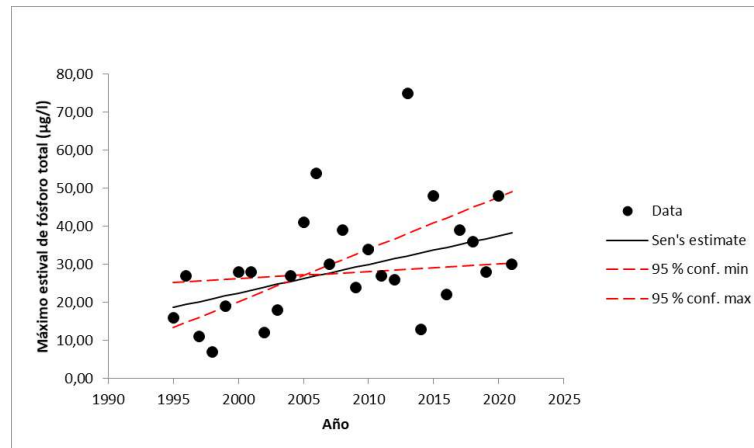


Fuente: CISE

Figura 65. Evolución anual del estado trófico de la laguna de Peñalara, con a) el TSI (Carlson, 1977) y b) la clasificación de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 1982). Se indican los límites entre las clases de estado trófico con línea punteada. El sombreado verde indica condiciones oligotróficas, el blanco indica condiciones mesotróficas y el rosado condiciones eutróficas para cada una de las variables.

La Figura 66 muestra la tendencia del máximo estival de fósforo total y de clorofila *a* en los meses centrales de verano. En ambos casos se aprecia una tendencia significativa [MAKESSENS  $Z > 0.05$ ; (Salmi et al., 2002)] de incremento a lo largo del período entre 1995-2021. No obstante, estas tendencias serían contradictorias con lo observado en cuanto al aumento de la transparencia (Figura 35), aunque este último no es significativo.

A



B

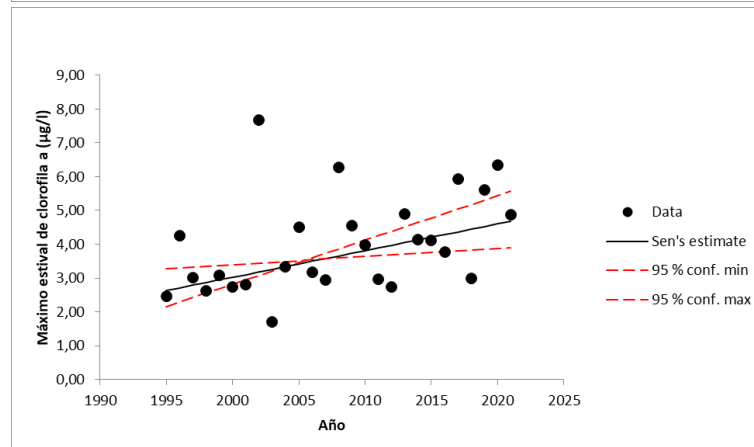


Figura 66. A) Estimación de la tendencia del máximo estival de fósforo total y B) de clorofila *a* 1996-2021.

Se ha sugerido que un deshielo más temprano durante inviernos más cálidos puede generar un menor contenido de clorofila *a* en los meses de verano (Hrycik et al., 2021), aunque se refiere a lagos más septentrionales. En el caso de la laguna de Peñalara cabe pensar que este incremento puede tener relación directa con los efectos del cambio climático, y viene a reforzar la idea de que las lagunas de alta montaña mediterráneas, como la laguna Grande de Peñalara, son un sistema ecológico distinto al de los lagos alpinos o más septentrionales a los que tradicionalmente se les ha asimilado. Por ello, no sólo es crucial mantener el seguimiento limnológico para comprobar esta hipótesis, sino que la necesidad de su conservación se refuerza por su estatus de sistemas escasos y extremadamente singulares.

## 5. Biota

### 5.1. Fitoplancton

En 2021 se ha realizado un estudio específico del fitoplancton que incluye la evolución de estos productores primarios en la laguna durante de 2021, pero también a largo plazo (interanual, décadas) para establecer los cambios derivados del cambio global. Este estudio se ha realizado con cargo al *Plan de Actuación sobre Humedales Catalogados de la Comunidad de Madrid* (Comunidad de Madrid, 2020b), por lo que se remite al informe de dicho estudio para la información sobre el fitoplancton en 2021.

### 5.2. Macroinvertebrados bentónicos

Los datos sobre los macroinvertebrados acuáticos de 2021 se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Listado de especies y abundancia relativa (individuos por muestra o unidad de esfuerzo) en mayo-agosto de 2021.

Clase	Orden	Familia	Especie	Individuos totales 2021
Bivalvia	Veneroidea	Sphaeriidae	<i>Pisidium casertanum</i>	100
Insecta	Coleoptera	Dytiscidae	<i>Agabus bipustulatus</i>	9
			<i>Agabus nebulosus</i>	4
			<i>Hydroporus</i> spp.	10
		Elmidae	<i>Oulimnius</i> sp	140
		Gyrinidae		1
		Helophoridae	<i>Helophorus</i> spp.	34
	Diptera	Ceratopogonidae		4
		Chironomidae		476
		Limonidae		2
	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Cloeon dipterum</i>	4
		Leptophlebiidae	<i>Habrophlebia lauta/fusca</i>	76
	Heteroptera	Corixidae	<i>Corixa affinis</i>	3
		Gerridae	<i>Gerris thoracicus</i>	2
		Notonectidae	<i>Notonecta glauca</i>	4
		Veliidae		1
	Megaloptera	Sialidae	<i>Sialis lutaria</i>	40
Plecoptera	Leuctridae		48	
Tricoptera	Leptoceridae	<i>Athripsodes braueri</i> (?)	124	
	Limnephilidae	<i>Allogamus ligonifer</i>	184	
Oligochaeta			104	

En el apartado 2 ya se ha mencionado la recuperación de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos, después de la definitiva erradicación del salvelino en el año 2002. A falta de confirmación de algún taxón que presenta alguna incertidumbre, en 2021 (4 muestreos) se localizaron al menos 21 táxones. Estas cifras están en concordancia con lo observado en los años anteriores, en la que los nuevos taxones de coleópteros y heterópteros habitan continuamente la laguna tras la erradicación del salvelino.

No se ha aplicado el índice IBCAEL, tal como se contempla en el desarrollo de la Directiva Marco del Agua para establecer la calidad ecológica, por que los estudios realizados por el Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación ya han puesto de manifiesto que no es aplicable a la laguna de Peñalara (Ver Anexo).

### 5.3. Macrófitos

La laguna de Peñalara siempre se había considerado como carente de vegetación acuática (macrófitos), a juzgar por las visitas realizadas a mediados de siglo pasado (Margalef, 1949) y los estudios más recientes (Toro y Montes, 1993; Granados et al., 2006). Sin embargo, a partir de 2015 se ha visto que empieza a crecer en la parte sur de la laguna *Glyceria declinata* y *Fontinalis antipyretica*. En 2016 además colonizó *Ranunculus flammula* y *Carex* sp. Esta situación ha venido ampliándose hasta 2021, con la formación de una pradera considerable (varios metros cuadrados) en la zona más somera y la aparición esporádica de *Callitriche brutia* en diversos puntos del litoral.

Por otra parte, en la orilla (fuera del agua, pero muy cerca de la lámina de agua) están creciendo *Salix* sp. y *Juncus* sp., dos especies bastante ligadas a la presencia de agua. Este hecho ya se conocía desde hace años, pero en los últimos cinco o seis años el crecimiento es mucho más patente.

Fuera de las especies netamente acuáticas o más o menos dependientes de la presencia continua de agua, es muy llamativo el crecimiento de pinos silvestres tanto en las orillas como por encima de la laguna en gran parte de su cuenca vertiente.

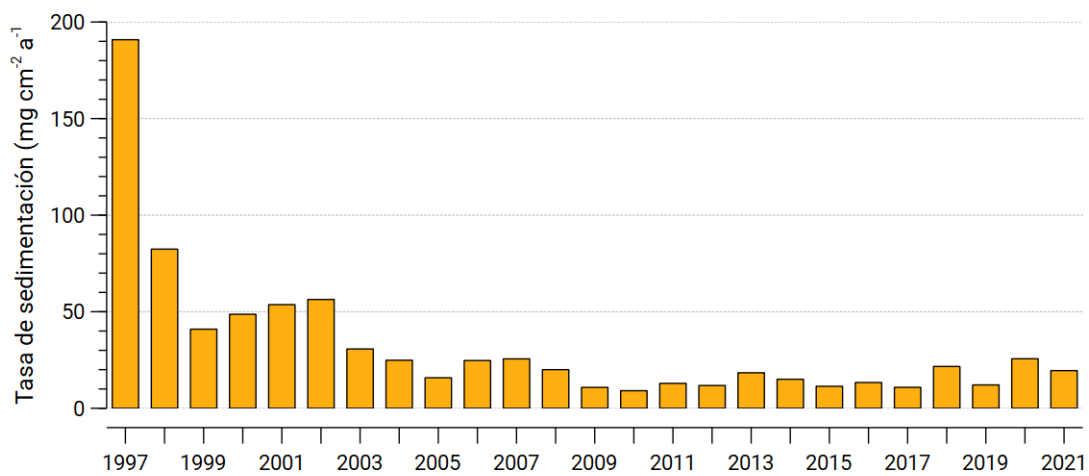


## 6. Trampas de sedimento

La Figura 67 muestra la acumulación anual de sedimento en la laguna de Peñalara entre 1997 y 2021. El fuerte descenso que se observa los primeros años, hasta cerca de 2003-2004, se debe a la revegetación de la morrena que cierra la laguna y que estaba sometida a una intensa erosión. Por ello, se tomaron una serie de medidas de gestión, como la prohibición del baño, la acampada y la limitación de acceso a la zona más erosionada del litoral de la laguna. A partir de 2005, la media de acumulación anual de sedimento se sitúa en  $16.38 \text{ mg cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ , y en 2021 ha sido de  $19.50 \text{ mg cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ .

### Tasa de sedimentación

Acumulación anual de sedimento



Fuente: CISE

Figura 67. Acumulación anual de sedimento en la laguna de Peñalara entre 1997 y 2021.

## 7. Estado ecológico

El artículo 107 del Plan Rector de Uso y Gestión (Comunidad de Madrid, 2020a), relaciona los indicadores mínimos para establecer el estado de conservación del parque nacional. Entre ellos se encuentra el denominado *Estado de conservación de la Laguna Grande de Peñalara*, así como otra serie de indicadores que ya han sido comentados anteriormente y que permiten darle un contexto hidrometeorológico a la interpretación del índice del estado de conservación (Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 13, Figura 14, Figura 15 y Figura 29).

Las lagunas de alta montaña de la Sierra de Guadarrama presentan de manera natural un nivel bajo de nutrientes y productividad. El enriquecimiento en nutrientes y una mayor producción primaria fitoplanctónica indica en consecuencia una degradación respecto a su estado natural. El incremento puede ser consecuencia de un mayor impacto de uso público en la cuenca (vertidos, erosión), incremento de la actividad ganadera, o bien por una mayor entrada de nutrientes vía atmosférica. Además, como se ha comentado en el apartado 4.13, actualmente se observa una tendencia significativa al incremento de nutrientes y productividad que puede estar relacionada con el cambio climático.

El proceso de eutrofización es complejo y ofrece dificultades de cuantificación (apartado 4.13), y ya se ha comentado que diferentes variables arrojan un estado trófico distintos para la laguna de Peñalara con los sistemas de clasificación tradicionales (Carlson, 1977; OECD, 1982). Por ello, en este indicador se ha pretendido integrar simultáneamente algunas de las variables físico-químicas más relevantes que se han presentado con anterioridad. Así, se ha optado por el índice de estado trófico TRIX (Vollenweider et al., 1998) que combina en un único valor las variables esenciales asociadas a la eutrofización, simplificando la comparación interanual y el establecimiento de umbrales de aviso.

El índice del estado trófico TRIX se calcula a partir de la fórmula:

$$TRIX = \frac{\log_{10}(Chla \times |\%Od| \times NID \times PRS) + K}{m}$$

Donde:

Chla = Concentración de clorofila a ( $\mu\text{g/l}$ )

|\%Od| = valor absoluto de la desviación del porcentaje de saturación del oxígeno disuelto ( $100 - \%Od$ )

NID = nitrógeno inorgánico disuelto N, es decir,  $[N-NO_3 + N-NO_2 + N-NH_4]$ , en ( $\mu\text{g N/l}$ )

PRS = fósforo reactivo soluble ( $\mu\text{g P-PO}_4/\text{l}$ )

Las constantes  $K = 1.5$  y  $m = 1.2$ , son valores de escala introducidos para ajustar el valor a 0-10 unidades TRIX.

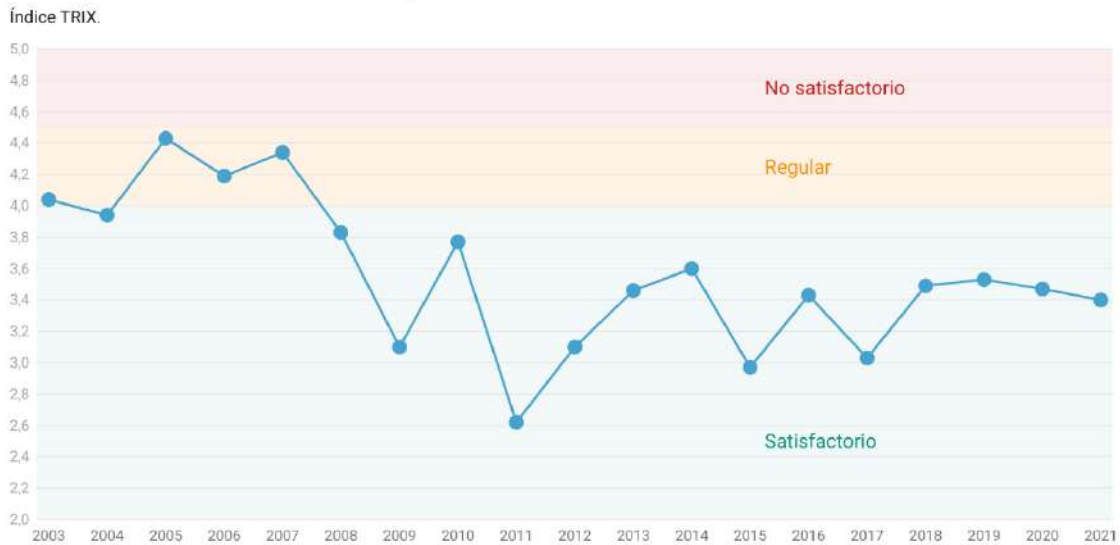
Se ha calculado el índice TRIX desde el año 2003 (Figura 68), fecha desde la que ya era apreciable una notable recuperación de los problemas ambientales detectados en esta laguna en la década

de los 90 del siglo XX (Granados et al., 2006). La media entre 2003 y 2016 es de 3.67, con un rango de 2.62-4.43. Con estos valores se han podido establecer unos umbrales de alerta e indicios de eutrofización conforme a la Tabla 3.

Tabla 3. Niveles para evaluar el estado de conservación de la laguna Grande de Peñalara.

TRIX	Comportamiento
<4	Satisfactorio
4.0-4.5	Regular
>4.5	No satisfactorio

### Estado de conservación de la Laguna Grande de Peñalara



*El índice del estado trófico TRIX se calcula a partir de los valores de concentración de clorofila, la desviación del porcentaje de saturación del oxígeno disuelto respecto al 100%, la concentración de nitrógeno inorgánico disuelto y la de fósforo reactivo soluble. Es un modo de cuantificar la evolución del estado trófico de determinada masa de agua a lo largo del tiempo, en una escala de 0 a 10. Los umbrales de alerta se han establecido a partir del Seguimiento limnológico mensual de esta laguna (1995-2016). Gráfico: Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación • Fuente: Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama • Creado con Datawrapper*

Figura 68. Sistema de Indicadores - Estado de conservación de la Laguna Grande de Peñalara,

La tendencia de estos años ha sido un descenso inicial del índice TRIX, conforme se han consolidado las actuaciones de restauración de la laguna, para posteriormente estabilizarse en un nivel satisfactorio.

## 8. Bibliografía

- Ansari, A.A., Singh Gill, S., Lanza, G.R., Rast, W. eds. . 2011. *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Bravo Utrera, M.A., Baltanás, A. 2020. Crustáceos. En Álvarez Cobelas, M., Sánchez Carrillo, S. (eds.), *Ecología acuática de Madrid*, Biblioteca de Ciencias, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* 22: 361-369.
- Comunidad de Madrid. 2020a. DECRETO 18/2020, de 11 de febrero, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama en el ámbito territorial de la Comunidad de Madrid. *Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid* 51: 3-97.
- Comunidad de Madrid. 2020b. DECRETO 26/2020, de 8 de abril, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Plan de Actuación sobre Humedales Catalogados de la Comunidad de Madrid. *Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid* 93: 2-335.
- Confederación Hidrográfica del Duero. 2019. Documento técnico sobre criterios para la evaluación del estado o potencial ecológico y del estado químico y global de las masas de agua superficiales en la CHD.
- Confederación Hidrográfica del Tajo. 2018. *Estado ecológico de las lagunas en la cuenca hidrográfica del Tajo (2012-2015)*.
- Granados, I. 2021. *Evolución del Estado Hidrológico y Ecológico de la Laguna Grande de Peñalara. 2019 - 2020*. Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama. Comunidad de Madrid.
- Granados, I., Toro, M., Rubio-Romero, A. 2006. *Laguna Grande de Peñalara: 10 años de seguimiento limnológico*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid.
- Hrycik, A.R., Isles, P.D.F., Adrian, R., Albright, M., Bacon, L.C., Berger, S.A., Bhattacharya, R. et al. 2021. Earlier winter/spring runoff and snowmelt during warmer winters lead to lower summer chlorophyll-a in north temperate lakes. *Global Change Biology* n/a: .
- Lewis Jr, W.M. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 40: 1779-1787.
- MAGRAMA. 2013a. *Protocolo de muestreo y laboratorio de invertebrados bentónicos en lagos. código: ML-L-I-2013*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- MAGRAMA. 2013b. *Protocolo para el cálculo del índice IBCAEL de invertebrados en lagos. código: IBCAEL-2013 Versión 1*. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

- MAGRAMA. 2015. Real Decreto 817/2015 por el que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales y las normas de calidad ambiental. *Boletín Oficial del Estado-BOE* 219: 80582-80677.
- Margalef, R. 1949. Datos para la hidrobiología de la Sierra de Guadarrama. *Publicaciones del Instituto de Biología Aplicada* VI: 5-21.
- OECD ed. . 1982. *Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control*. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris : [Washington, D.C.
- Petrov, M.P., Terzhevik, A.Y., Palshin, N.I., Zdorovenov, R.E., Zdorovenova, G.E. 2005. Absorption of Solar Radiation by Snow-and-Ice Cover of Lakes. *Water Resources* 32: 496-504.
- PNSG. 2021. Sistema de observación meteorológica. *Web oficial del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama*.
- Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T., Amnell, T. 2002. *Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKESENS*. Finnish Meteorological Institute, Helsinki.
- Toro, M., Granados, I. 1998. *Inventario, cartografía y caracterización de las charcas y lagunas del Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara*. Comunidad de Madrid.
- Toro, M., Montes, C. 1993. *Bases limnológicas para la gestión del sistema lagunar del Parque Natural de la Cumbre, Circo y Lagunas de Peñalara*. Comunidad de Madrid.
- Vollenweider, R.A., Giovanardi, F., Montanari, G., Rinaldi, A. 1998. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index. *Environmetrics* 9: 329-357.
- Winslow, L., Read, J., Woolway, R., Brentrup, J., Leach, T., Zwart, J., Albers, S., Collinge, D. 2019. *rLakeAnalyzer: Lake Physics Tools*.
- Zhang, Y., Li, M., Dong, J., Yang, H., Van Zwieten, L., Lu, H., Alshameri, A. et al. 2021. A Critical Review of Methods for Analyzing Freshwater Eutrophication. *Water* 13: 225.

## ANEXO - Análisis de la aplicación del índice IBCAEL al caso concreto de los Humedales del Macizo de Peñalara

v0 diciembre 2021

### Antecedentes y justificación

La Comunidad de Madrid lleva realizando investigaciones y seguimientos limnológicos en los ecosistemas acuáticos del Macizo de Peñalara desde principios de los años 90 del siglo pasado. El inicio de este seguimiento limnológico es, por tanto, anterior al desarrollo de la Directiva Marco del Agua (DMA) y en consecuencia se han utilizado metodologías estándar en el estudio de ecosistemas acuáticos (Toro y Montes, 1993; Granados et al., 2006), pero no coincidentes con los protocolos actuales referidos a la DMA.

Recientemente el Centro de Investigación, Seguimiento y Evaluación de la Sierra de Guadarrama se ha propuesto aplicar también los protocolos DMA con el fin de conocer el grado de coherencia con la metodología que se ha venido utilizando hasta la fecha. Entre ellos se ha utilizado el IBCAEL, un índice de invertebrados en lagos que se aplica a nivel nacional.

Los resultados obtenidos indican que el protocolo IBCAEL tiene graves carencias para su aplicación al caso concreto de los Humedales del Macizo de Peñalara, con una bajísima sensibilidad respecto al estado ecológico real de estos humedales y que, en la inmensa mayoría de las ocasiones, termina asignando irremediamente una calidad mala a estas masas de agua.

### IBCAEL

#### Cálculo

Para el cálculo de este índice se requiere el muestreo, la identificación y el procesado en laboratorio de las diferentes especies de invertebrados, según los procedimientos descritos en el protocolo de muestreo y laboratorio de invertebrados bentónicos en lagos (MAGRAMA, 2013a; b).

El IBCAEL se compone de dos métricas distintas, los índices ABCO y RIC:

$$IBCAEL = (ABCO + 1) \times \log (RIC + 1)$$



El índice ABCO valora la estructura y composición de las asociaciones de crustáceos presentes a partir de la abundancia de las especies de branquiópodos, copépodos y ostrácodos indicadoras de la tipología del lago en cuestión.

$$ABCO = \sum_{i=1}^j ki \times ni$$

Donde:

- $i$  = Taxones indicadores del tipo de lago.
- $j$  = Número de taxones indicadores del tipo de lago.
- $ki$  = Valor de sensibilidad del taxón  $i$ .
- $ni$  = Abundancia relativa del taxón  $i$ . Se calcula como  $Ni/N_{tot}$ ; siendo:  $Ni$  = número de individuos del taxón  $i$  y  $N_{tot}$  = suma del número total de individuos de taxones indicadores del tipo de lago muestreado.

Por su parte, el índice RIC valora la riqueza taxonómica de insectos y crustáceos en el conjunto de la comunidad bentónica del lago, calculándose mediante la siguiente fórmula:

$$RIC = A + B + C$$

Donde:

- $A$  = Número de géneros de crustáceos identificados en la muestra de RIC y en la muestra de ABCO (tanto indicadores como no indicadores). Salvo en los lagos de tipología IBCAEL 2, también se consideran los taxones planctónicos.
- $B$  = Número de géneros de formas adultas de coleópteros y heterópteros.
- $C$  = Número de familias de insectos en forma de larvas, ninfas y/o pupas.

En definitiva, **el valor final del IBCAEL está determinado por el producto de la parte ABCO y la parte RIC, por lo que los posibles valores que puedan tomar estas dos partes de la fórmula son determinantes en el resultado final.**

## Clases de calidad

Las lagunas del Macizo de Peñalara pertenecen a la tipología de masas de agua lagos L-T03 (Alta montaña septentrional, poco profundo, aguas ácidas) o L-T05 (Alta montaña septentrional, temporal). Ambos tipos de masa de agua tipo lago pertenecen a su vez al tipo IBCAEL 1 (Alta montaña).

De acuerdo a los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales (MAGRAMA, 2015), estas son las condiciones de referencia y límites de cambio de clase de estado tanto para el tipo L-T03 como para el tipo L-T05

Condición de referencia	Límite de cambio de clase de estado (RCE) <sup>1</sup>			
	Muy bueno/bueno	Bueno/ moderado	Moderado/ deficiente	Deficiente/ malo
8.62	0.92	0.69	0.46	0.23

O lo que es lo mismo, las diferentes clases de calidad se obtienen superando los siguientes valores:

- Deficiente: IBCAEL < 1.98
- Malo:  $1.98 \leq \text{IBCAEL} < 3.97$
- Moderado:  $3.97 \leq \text{IBCAEL} < 5.95$
- Bueno:  $5.95 \leq \text{IBCAEL} < 7.93$
- Muy bueno:  $\text{IBCAEL} \geq 7.93$

## Aplicación al caso concreto de las lagunas del Macizo de Peñalara

Para ver los posibles valores finales del IBCAEL se van a desarrollar dos escenarios:

**Escenario 1:** NO está presente ninguna especie de crustáceo indicadora del tipo de masa de agua.

- En este caso, la parte ABCO del IBCAEL es siempre<sup>2</sup> igual a 1, quedando prácticamente todo el peso del IBCAEL en la parte RIC del cálculo del IBCAEL.
- Dado que la parte RIC es logarítmica, se requeriría el siguiente número de géneros/familias que puntúan en el RIC para que se pudiesen alcanzar las distintas clases de calidad:
  - Entre 0 y 8 géneros/familias para una calidad deficiente.
  - Entre 9 y 935 géneros/familias para una calidad mala.
  - Más de 935 géneros/familias para una calidad moderada, buena o muy buena, lo cual es una situación absolutamente irreal.
- Es muy difícil que en las lagunas de montaña del Macizo de Peñalara se obtenga un RIC menor de 9, por lo que **en ausencia de crustáceos indicadores es casi imposible obtener una calidad ecológica distinta de mala**. En cualquier caso, no es posible alcanzar ninguna categoría superior.

<sup>1</sup> El valor del RCE se obtiene mediante la división del resultado de la aplicación del índice por el valor de la condición de referencia.  $\text{RCE} = \text{Valor medido} / \text{Valor de referencia}$

<sup>2</sup> En este caso el ABCO es igual a cero y el componente ABCO del IBCAEL es  $(\text{ABCO}+1) = 1$

## **Escenario 2: Sí está presente alguna especie de crustáceo indicadora del tipo de masa de agua.**

- En el Macizo de Peñalara se han citado 4 especies indicadoras (de 9 posibles): *Alona affinis*, *Alonella nana*, *Chydorus sphaericus*, *Eucyclops serrulatus* (Toro y Granados, 1998; Granados et al., 2006; Bravo Utrera y Baltanás, 2020). *Chydorus sphaericus* aparece ocasionalmente en proporciones medias o altas, el resto sólo han sido observadas en proporciones bajas o muy bajas en relación con el total de la comunidad de crustáceos. Es importante señalar que este escenario se produce incluso cuando solo aparece un único individuo de una especie indicadora entre decenas o centenares de individuos de otras especies.
- Estas 4 especies tienen un valor de sensibilidad entre 7 y 9, por lo que la parte ABCO del IBCAEL oscilará<sup>3</sup> entre 8 y 10 en función de la proporción relativa de las especies indicadoras presentes.
- En el peor de los posibles valores de la parte ABCO (=8), las posibles clases de calidad que se obtienen quedarían de la siguiente manera:
  - Dado que al menos hay un género que puntúa para el RIC (el que ha sido contabilizado en el ABCO), es matemáticamente imposible la calidad deficiente.
  - A partir de 9 géneros/familias, se alcanza la calidad muy buena.
- Como se ha comentado en el escenario anterior, es muy difícil que en las lagunas de montaña del Macizo de Peñalara se obtenga un RIC menor de 9, por lo que **en presencia de algún crustáceo indicador es casi imposible obtener una calidad ecológica distinta de muy buena**. En el caso de que se diera un RIC menor de 9, las clases de calidad malo, moderado o bueno estarían tan solo separadas por la aparición de uno o dos géneros/familias.

En definitiva, **las únicas clases de calidad razonablemente posibles para las lagunas del Macizo de Peñalara con el sistema actual de cálculo del IBCAEL son o MALO o MUY BUENO, en función de que aparezca (o no) algún individuo de alguna de las 4 posibles especies indicadoras.**

Es más, tal como establece la DMA, la evaluación del estado viene determinada por la comparación de los diferentes indicadores registrados en la masa de agua respecto a los valores de referencia atendiendo al más restrictivo. Es decir, **si el IBCAEL obtiene la valoración malo, entonces el estado de las lagunas del macizo se clasifica como malo independientemente de los valores de los indicadores físico-químicos, de macrófitos, de fitoplancton, etc.** Es el caso

---

<sup>3</sup> Por ejemplo, suponiendo que el 50% de los individuos indicadores tienen un valor de sensibilidad de 7 y el otro 50% un valor de sensibilidad de 8, el ABCO sería 7.5 y el componente ABCO del IBCAEL sería (ABCO+1) = 8.5.

por ejemplo de los resultados presentados en el *Estado ecológico de las lagunas en la cuenca hidrográfica del Tajo (2012-2015)*<sup>4</sup> (Confederación Hidrográfica del Tajo, 2018)

## IBCAEL Revisado

La Confederación Hidrográfica del Duero ha desarrollado un IBCAEL revisado para dicha demarcación denominado QAELS<sub>Duero2016</sub> (Confederación Hidrográfica del Duero, 2019), que incluso está aceptado provisionalmente en el Real Decreto por que se establecen los criterios de seguimiento y evaluación del estado de las aguas superficiales (MAGRAMA, 2015). La diferencia con el índice original es que se han incorporado nuevas especies indicadoras y valores de sensibilidad. También se han actualizado las condiciones de referencia y límites de cambio de clase:

- El QAELS<sub>Duero2016</sub> aumenta de 9 a 24 el número de especies indicadoras del tipo Alta Montaña (y modifica alguno de los valores de sensibilidad previos)
- Los nuevos valores para la asignación de clase de calidad son:

Condición de referencia	Límite de cambio de clase de estado (RCE) – IBCAEL REVISADO			
	Muy bueno/bueno	Bueno/ moderado	Moderado/ deficiente	Deficiente/ malo
10.11	0.87	0.66	0.44	0.22

Tentativamente, se ha analizado la posible aplicación del QAELS<sub>Duero2016</sub> al caso concreto de las lagunas del Macizo de Peñalara:

- Ninguna de las 15 nuevas especies indicadoras está citada en el Macizo de Peñalara (Bravo Utrera y Baltanás, 2020) y sólo 4 de ellas están citadas en la Comunidad de Madrid<sup>5</sup> (*Macrocylops abidus*, *Megacyclops viridis*, *Candona cf. neglecta* y *Cypridopsis vidua*).
- Por tanto, la probabilidad de encontrar alguna especie indicadora permanece prácticamente igual en la versión IBCAEL revisada y, en consecuencia, en ausencia de estas especies el IBCAEL tiende irremediablemente a calidad mala.

<sup>4</sup> Además, dicho informe presenta valores de ABCO incompatibles con la formulación matemática del índice, por lo que da la impresión de que se han calculado como si  $N_{tot}$  incluyese el número total de individuos de todos los táxones presentes y no sólo de los taxones indicadores.

<sup>5</sup> El grado de conocimiento de los ostrácodos del Macizo de Peñalara es mucho menor que de branquiópodos y copépodos, por lo que posible que algunas de estas especies sí estén o hayan estado realmente presentes en el macizo.

- En el caso de aparecer alguna de las 4 especies que sí están citadas, la valoración final del IBCAEL cambia ligeramente como consecuencia del cambio del valor de sensibilidad asignado a estas especies en el QAELS<sub>Duero2016</sub>:
  - Estas especies tienen ahora un valor de sensibilidad entre 5 y 10, por lo que la parte ABCO del IBCAEL oscilará entre 6 y 11 en función de la proporción relativa de las especies indicadoras presentes.
  - En el peor de los posibles valores del ABCO (100% de *Chydorus sphaericus* con una sensibilidad de 5), a partir de 13 géneros/familias del RIC (un valor moderado y relativamente frecuente) se alcanzaría la calidad buena, pero se requerirían 30 géneros/familias para alcanzar la calidad muy buena, que es un valor bastante elevado para el RIC.

Es decir, el IBCAEL revisado en la versión QAELS<sub>Duero2016</sub> aplicado a las lagunas del Macizo de Peñalara mejora ligeramente respecto a la versión previa, pero continua mostrando una tendencia muy poco deseable hacia los extremos: o bien tiene calidad mala en ausencia de especies indicadoras o bien tiene calidad buena (con una proporción dominante de *Chydorus sphaericus*) o muy buena (con una proporción dominante de otras especies indicadoras), casi independientemente del resto de géneros/familias de invertebrados acuáticos presentes en estas masas de agua.

## Conclusiones de la aplicación del Índice IBCAEL

Por todo lo anterior, consideramos que tanto el IBCAEL como su versión revisada QAELS<sub>Duero2016</sub> lamentablemente no son de utilidad para determinar la calidad de los Humedales del Macizo de Peñalara.