

Informe ID21I10297

M. Abel Herrera y Francisco Zambrano

2025-03-30

Tabla de contenidos

Acerca del Informe	10
Prefacio	11
Introducción	12
I Materiales y método	13
1 Área de estudio y riego	14
2 Metodología y reporte 2022-2023	17
II Producción	18
3 Producción	19
3.1 Peso total	19
4 Por tratamiento	20
5 Por temporada	21
5.1 Rendimiento	21
6 Por tratamiento	22
7 Por temporada	23
7.1 Densidad	23
8 Por tratamiento	24
9 Por temporada	25
10 Calidad	26
10.1 Apariencia	26
10.1.1 Peso	26
11 Por tratamiento	27

12 Por temporada	28
12.0.1 Diametro	28
13 Por tratamiento	29
14 Por temporada	30
14.1 Color	30
15 Por tratamiento	31
16 Por temporada	32
16.1 Contenido de azucar	32
17 Por tratamiento	33
18 Por temporada	34
18.1 Daño	34
19 Por tratamiento	35
20 Por temporada	36
III Variables meteorológicas	37
21 Clima	38
22 Temperatura	39
23 Déficit de presión de vapor (VPD)	40
24 Evapotranspiración de referencia (ET0)	41
25 Precipitación	42
26 Humedad de suelo	43
27 Por tratamiento	44
28 Por temporada	45
29 Serie temporal 2022-2023	46
30 Serie temporal 2023-2024	47

IV Parámetros fisiológicos	48
31 Parámetros fisiológicos	49
31.1 Fluorescencia	49
32 Series temporales	50
33 Distribución por mes	51
33.1 Potencial	51
34 Series temporales	53
35 Distribución por mes	54
35.1 LAI	54
36 Series temporales	56
37 Distribución por mes	57
38 Curvas Presión-volumen	58
38.1 La Esperanza	59
39 Tratamiento 0 (control)	60
40 Tratamiento 4	63
40.1 Rio Claro	65
41 Tratamiento 0 (control)	66
42 Tratamiento 1	69
43 Tratamiento 2	72
44 Tratamiento 3	74
45 Tratamiento 4	77
46 Referencias	80
47 Punto de pérdida de turgor	81
V Preprocesamiento de datos de turgor	83
48 Clustering	87
48.1 La Esperanza	87

49 T1 (2022-2023)	88
50 T2 (2022-2023)	90
51 T3 (2022-2023)	92
52 T4 (2022-2023)	94
53 T1 (2023-2024)	96
54 T2 (2023-2024)	98
55 T3 (2023-2024)	100
56 T4 (2023-2024)	102
56.1 Rio Claro	103
57 T1 (2022-2023)	104
58 T2 (2022-2023)	106
59 T3 (2022-2023)	108
60 T4 (2022-2023)	110
61 T1 (2023-2024)	112
62 T2 (2023-2024)	114
63 T3 (2023-2024)	116
64 T4 (2023-2024)	118
65 Limpieza de datos: eliminación de clusters	120
65.1 La Esperanza	120
66 T1 (2022-2023)	121
67 T2 (2022-2023)	123
68 T3 (2022-2023)	125
69 T4 (2022-2023)	127
70 T1 (2023-2024)	129
71 T2 (2023-2024)	131

72 T3 (2023-2024)	133
73 T4 (2023-2024)	135
73.1 Rio Claro	136
74 T1 (2022-2023)	137
75 T2 (2022-2023)	139
76 T3 (2022-2023)	141
77 T4 (2022-2023)	143
78 T1 (2023-2024)	145
79 T2 (2023-2024)	146
80 T3 (2023-2024)	148
81 T4 (2023-2024)	150
82 Estandarización de clusters	152
82.1 La Esperanza	152
83 T1 (2022-2023)	153
84 T2 (2022-2023)	155
85 T3 (2022-2023)	157
86 T4 (2022-2023)	159
87 T1 (2023-2024)	161
88 T2 (2023-2024)	163
89 T3 (2023-2024)	165
90 T4 (2023-2024)	167
90.1 Rio Claro	168
91 T1 (2022-2023)	169
92 T2 (2022-2023)	171
93 T3 (2022-2023)	173

94 T4 (2022-2023)	175
95 T1 (2023-2024)	177
96 T2 (2023-2024)	178
97 T3 (2023-2024)	180
98 T4 (2023-2024)	182
99 Datos preprocesados	184
99.1 A nivel de unidad	184
99.1.1 La Esperanza	184
100T1 (2022-2023)	185
101T2 (2022-2023)	188
102T3 (2022-2023)	191
103T4 (2022-2023)	194
104T1 (2023-2024)	197
105T2 (2023-2024)	200
106T3 (2023-2024)	203
107T4 (2023-2024)	206
107.0.1 Rio Claro	208
108T1 (2022-2023)	209
109T2 (2022-2023)	212
110T3 (2022-2023)	215
111T4 (2022-2023)	218
112T1 (2023-2024)	221
113T2 (2023-2024)	223
114T3 (2023-2024)	226

115T4 (2023-2024)	229
115.1A nivel de tratamiento	231
115.1.1 La Esperanza	231
116T1 (2022-2023)	232
117T2 (2022-2023)	233
118T3 (2022-2023)	234
119T4 (2022-2023)	235
120T1 (2023-2024)	236
121T2 (2023-2024)	237
122T3 (2023-2024)	238
123T4 (2023-2024)	239
124T1 (2022-2023)	240
125T2 (2022-2023)	241
126T3 (2022-2023)	242
127T4 (2022-2023)	243
128T1 (2023-2024)	244
129T2 (2023-2024)	245
130T3 (2023-2024)	246
131T4 (2023-2024)	247
VI Modelo de potencial y SatOri	248
132 Modelos predictivos de potencial	249
133 SatOri	251
133.1 Descripción general	251
133.2 Diseño de la aplicación	251
133.2.1 Funcionamiento de la aplicación	251
133.3 Dashboard de la plataforma	252

133.4 Acceso a la plataforma	253
References	254

Acerca del Informe

Reporte general del proyecto ID21I10297, financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) por medio del proyecto FONDEF IDEA 2021.

Este proyecto estuvo a cargo del director Dr. Francisco Zambrano Bigiarini de la Universidad Mayor.

Investigadores que participaron en el proyecto:

- Dr. Francisco Zambrano - Director - Centro Hemera UMayor
- Dra. Andrea Miyasaka Almeyda - Directora Alterna - Centro CGB UMayor
- Dr. Felipe de La Hoz - Investigador - Externo
- Paulina Vidal - Investigadora - Centro Hemera UMayor
- Idania Briceño - Investigadora - Centro Hemera UMayor

Además, trabajaron como asistentes de investigación los siguientes profesionales:

- Jesica Garrido - Centro Hemera UMayor
- Abel Herrera - Centro Hemera UMayor

Prefacio

Este informe presenta metodología y los resultados obtenidos en el marco del proyecto FONDEF ID21I10297. En este proyecto se desarrolló **SatOri**, una aplicación para la optimización de riego en frutales. La que contribuye a la adaptación al cambio climático de la agricultura chilena.

SatOri desarrolló un modelo para la estimación espacial con frecuencia diaria del potencial hídrico xilemático (Ψ_x). El Psi_x permite monitorear la respuesta de la planta a las condiciones medio ambientales y de abastecimiento hídrico. Se utilizaron algoritmos de machine learning, datos meteorológicos y de imágenes satelitales Sentinel-2, para el desarrollo del modelo.

Por otra parte, **SatOri** calcula el nivel de Psi_x mínimo que pueden alcanzar los árboles. De esta manera establece un semáforo de acuerdo a este umbral y a los resultados del modelo. Indicando al agricultor cuánto es el tiempo de riego que debe suministrar cada sector, para que no se vea afectado el aparato fotosintético de la planta y así no haya merma en la producción y calidad de la fruta.

Introducción

El cambio climático ha intensificado la sequía en diversas regiones del mundo, afectando particularmente a Chile Central, donde se ha registrado un evento de Mega Sequía sin precedentes en los últimos milenios. Desde 2010, la zona ha experimentado una reducción sostenida de las precipitaciones, con déficits promedio entre 20-40% (Garreaud et al. 2020). Este fenómeno impacta directamente la disponibilidad hídrica para la agricultura, con repercusiones en la productividad y sostenibilidad del sector (Peña-Guerrero et al. 2020). Ante este escenario, se requieren estrategias de gestión del agua más eficientes que permitan a los productores agrícolas adaptarse a la variabilidad climática (Hurlbert y Gupta 2017).

En este contexto, el riego deficitario controlado (RDC) ha sido identificado como una estrategia eficaz para optimizar el uso del agua en cultivos perennes como los frutales, donde las opciones de adaptación son limitadas (Pechan et al. 2023). Esta práctica permite reducir el consumo hídrico sin afectar significativamente la producción ni la calidad de la cosecha, mejorando la eficiencia del recurso disponible (Victor Blanco et al. 2019; López-Olivari y Ortega-Klose 2021). Entre los frutales de exportación, el cerezo es el segundo producto de mayor valor en la agroindustria chilena, con más de 25 000 hectáreas bajo riego y un mercado aproximado de 1560 millones de dólares (Carrasco-Benavides, Antunez-Quilobrán, et al. 2020; González 2022). La optimización del riego en este cultivo es fundamental para mejorar la sostenibilidad del sector y mantener su competitividad a nivel internacional.

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un prototipo de servicio web para la optimización del riego en cerezo (SatOri), que permita a los productores ajustar los tiempos y volúmenes de riego en función de datos obtenidos de sensores satelitales ópticos y de radar, complementados con ensayos de riego deficitario controlado. Para ello, se evaluará el nivel de riego deficitario óptimo en huertos de cerezo ubicados en la región de O'Higgins durante las temporadas 2022-2023, desarrollando un modelo de estimación del potencial hídrico xilemático (Ψ_s) basado en variables meteorológicas y satelitales. Posteriormente, el modelo y los niveles óptimos de riego serán validados en la temporada 2023-2024, con el fin de integrarlos en una plataforma web que entregue información en tiempo real sobre la gestión del riego, contribuyendo así a la eficiencia en el uso del agua en la producción de cerezas.

Parte I

Materiales y método

1 Área de estudio y riego

El estudio se realizó en dos huertos comerciales de cerezos dulces (*Prunus avium* L., variedad Regina) de la empresa Garces Fruit (www.garcesfruit.com) en la región de O'Higgins, en la zona central de Chile. Los huertos son Rio Claro, que tiene 60 ha y árboles de 9 años, y La Esperanza, con 40 ha y árboles de 6 años (Fig. 1a y 1b). El estudio se llevó a cabo durante las temporadas de riego 2022-2023 y 2023-2024, que van de octubre a abril.

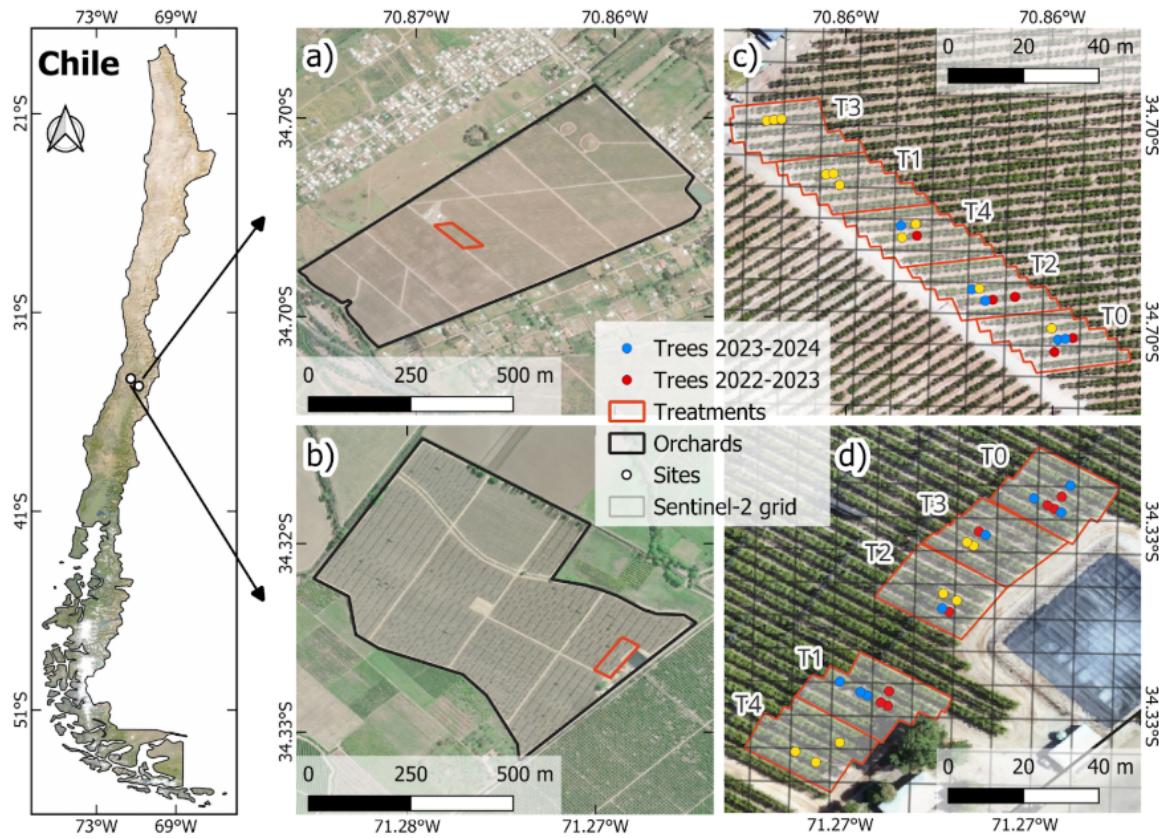


Figura 1.1: Figura 1. Área de estudio. El mapa a la izquierda muestra la ubicación de los huertos en la región central de Chile. Los mapas a la derecha muestran los huertos en (a) Rio Claro y (b) La Esperanza, y (c) y (d) representan los tratamientos de riego (T0, T1, T2, T3, T4). Los puntos rojos y azules representan los árboles experimentales seleccionados para las temporadas 2022-2023 y 2023-2024, respectivamente, mientras que los puntos amarillos indican los árboles seleccionados para ambas temporadas.

Para aumentar la variabilidad del estado hídrico de las plantas, se implementaron cinco tratamientos diferentes de reposición de riego en cada huerto. La cantidad de riego se gestionó utilizando el ET0 y Ψ_s como referencias. Los tratamientos de riego fueron T1, T2, T3 y T4, siendo T1 el menos restrictivo y T4 el más restrictivo en cuanto al suministro de agua (Fig. 1c y 1d). Además, se estableció un tratamiento control (T0), el cual recibió el riego estándar proporcionado por el productor local. Cada parcela de tratamiento contuvo 60 árboles y abarcó un área de 0.048 ha. Los tratamientos se aplicaron durante las temporadas consecutivas de crecimiento 2022–2023 y 2023–2024. No obstante, en la segunda temporada no se aplicaron los tratamientos T1 a T4 en La Esperanza, ya que los resultados obtenidos en la temporada anterior no mostraron un impacto significativo de los tratamientos de restricción hídrica. La

Figura 2 ilustra la profundidad acumulada de agua (mm) para cada tratamiento durante el riego, así como el porcentaje relativo a ET0.

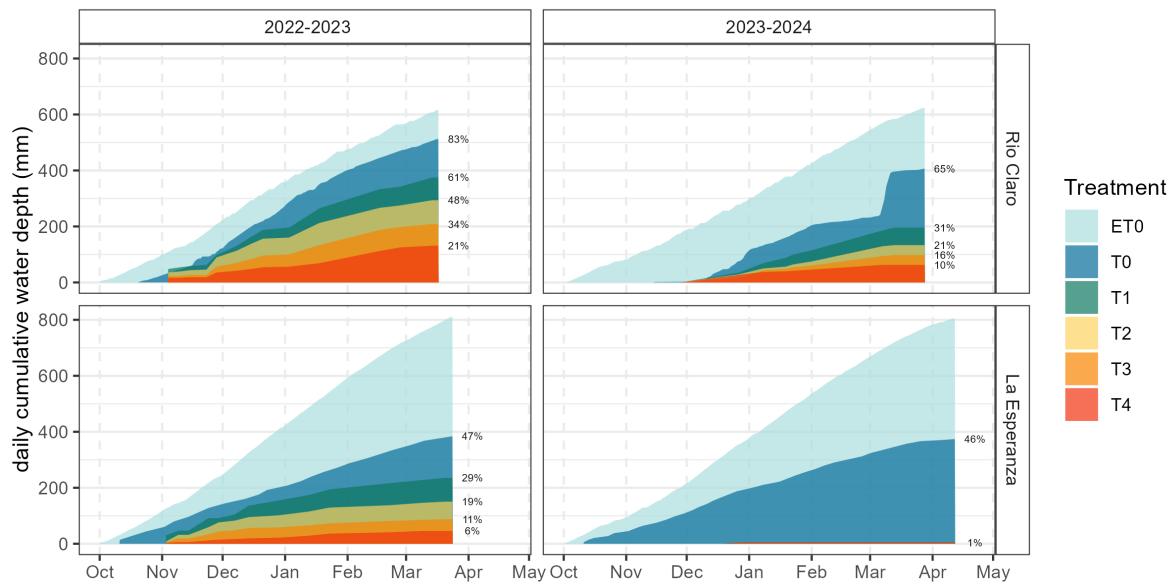


Figura 1.2: Figura 2. Variación de la profundidad acumulada diaria de agua (mm) aplicada por riego por tratamiento en comparación con la evapotranspiración de referencia (ET0). El punto de inicio para la acumulación de ET0 corresponde al primer día de riego para cada huerto y temporada.

2 Metodología y reporte 2022-2023

Los detalles metodológicos sobre la toma de muestras y el procesamiento de variables utilizadas en este estudio han sido descritos en el reporte “Efecto de estrategias de riego deficitario sobre la productividad y calidad de huertos de cerezos, variedad Regina”, elaborado por el Dr. Manuel Muñoz el 3 de diciembre de 2024. Dicho reporte abarca exclusivamente los resultados correspondientes a la temporada 2022-2023, mientras que los materiales y métodos para la temporada 2023-2024 siguen siendo los mismos.

Para revisar los procedimientos específicos empleados o analizar los resultados de la temporada 2022-2023 de manera independiente, se recomienda acceder al reporte completo en el siguiente [enlace](#).

Las mediciones de producción y calidad de los frutos se realizaron en las fechas de cosecha de cada sitio. Los resultados de producción y calidad que puede ser revisados en el reporte 2022-2023 corresponden a las fechas de cosecha del 23 de diciembre de 2022 en Río Claro y el 12 de diciembre de 2022 en La Esperanza. El reporte actual, en adición, muestra los resultados de la cosecha en la temporada 2023-2024 solo para La Esperanza, con fecha el 12 de diciembre del 2023.

Parte II

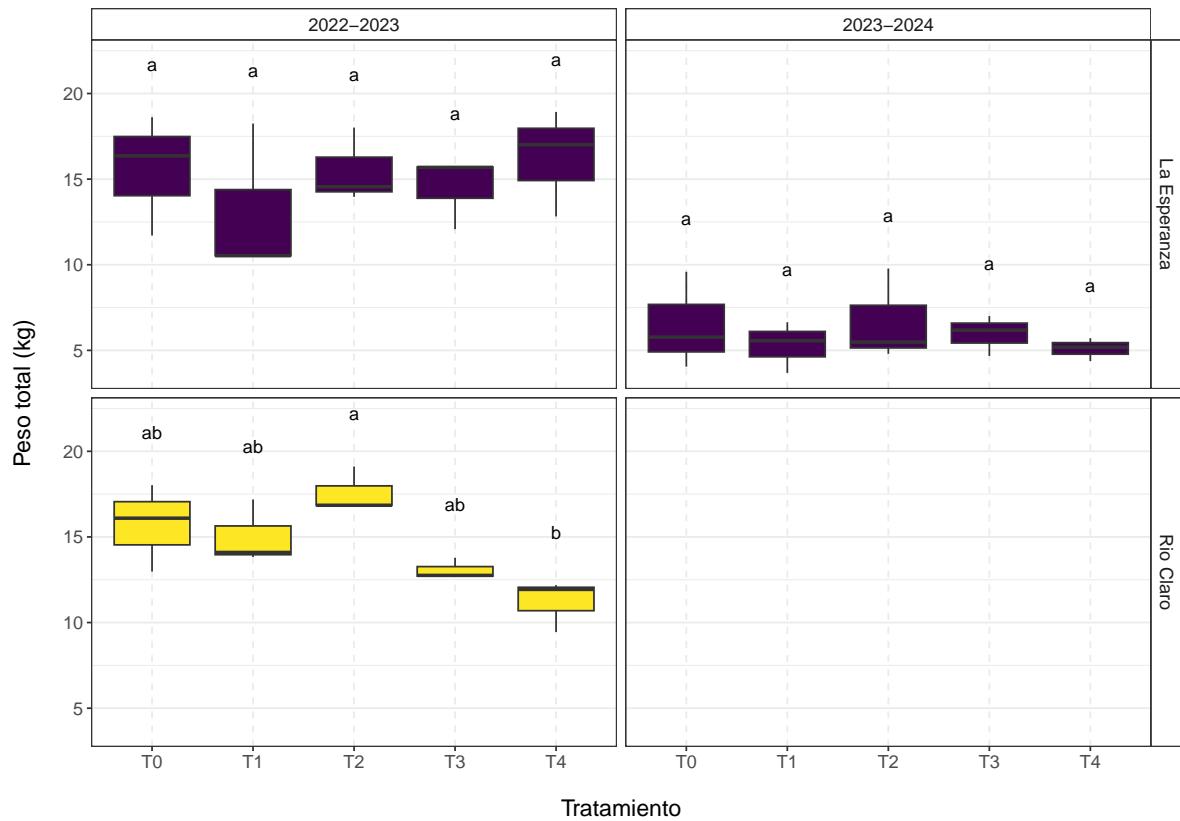
Producción

3 Producción

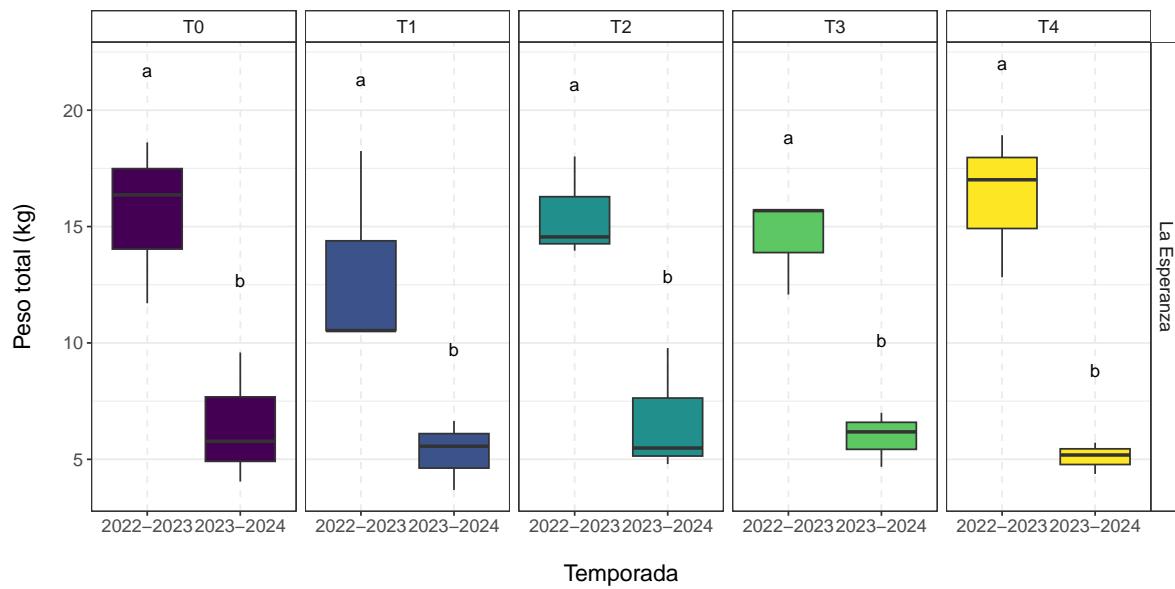
3.1 Peso total

En La Esperanza, el peso total de la producción fue menor en la temporada 2023-2024 en comparación con 2022-2023, con una reducción general en todos los tratamientos, incluido el control (T0). En ambos años, T2 y T4 presentaron valores ligeramente superiores en comparación con los demás tratamientos con déficit. En la primera temporada de Río Claro, T2 mostró los valores más altos, mientras que T4 presentó los más bajos.

4 Por tratamiento

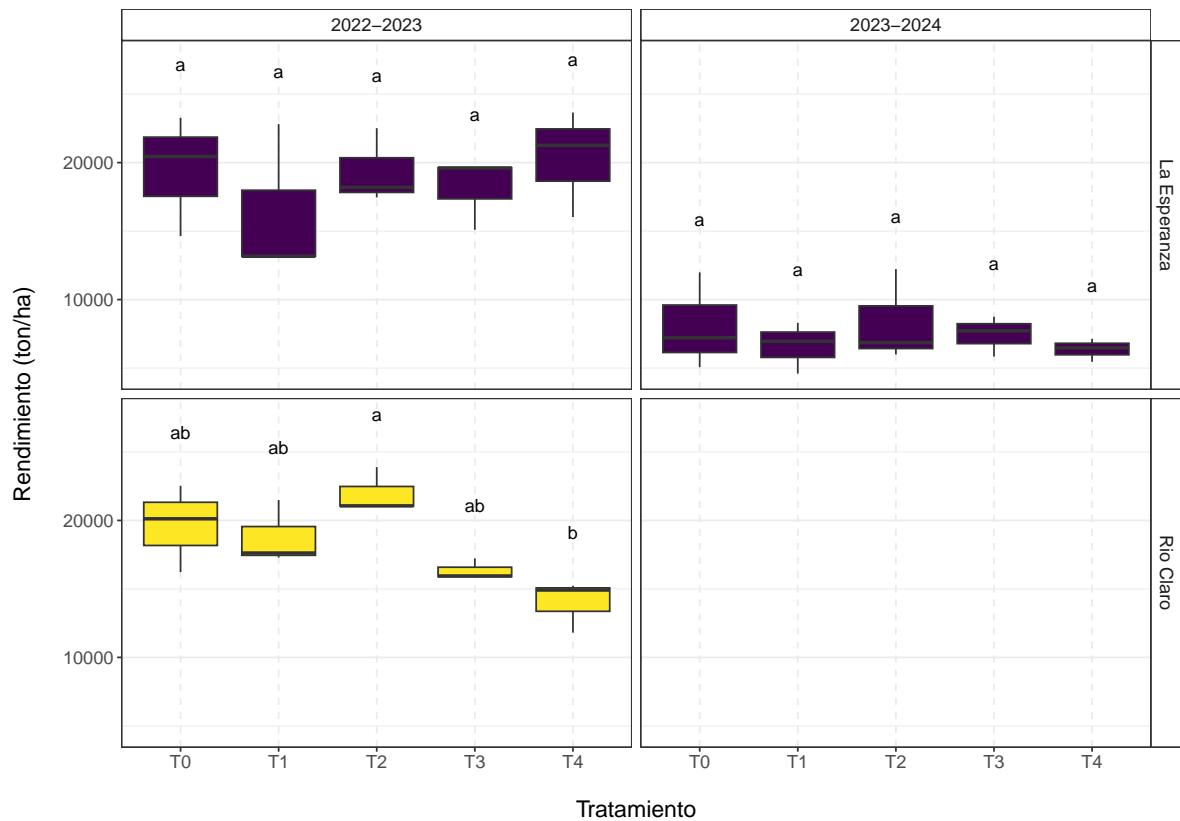


5 Por temporada

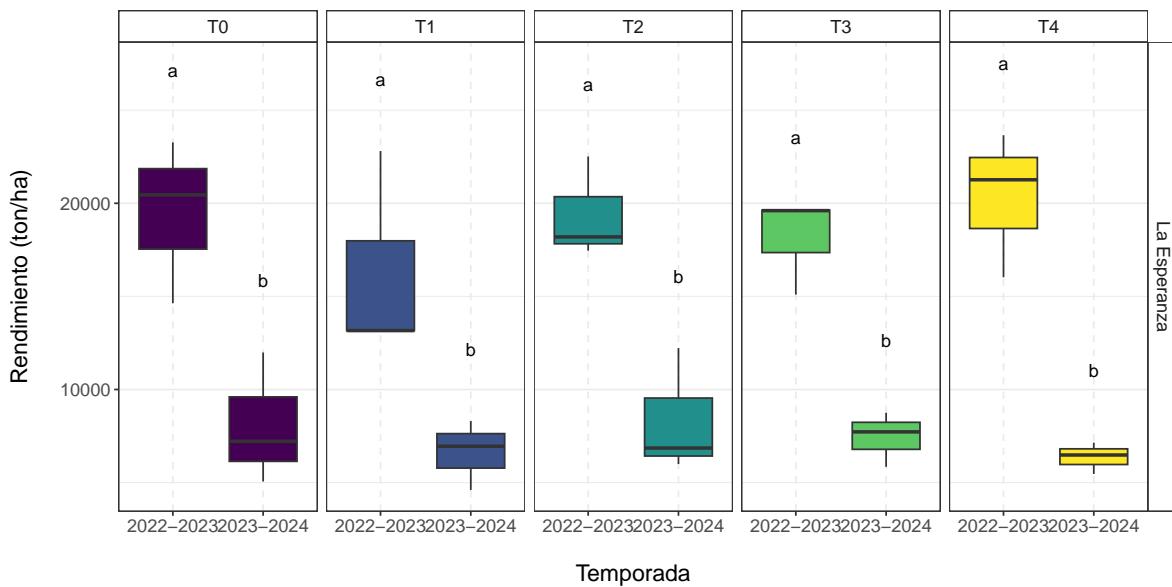


5.1 Rendimiento

6 Por tratamiento



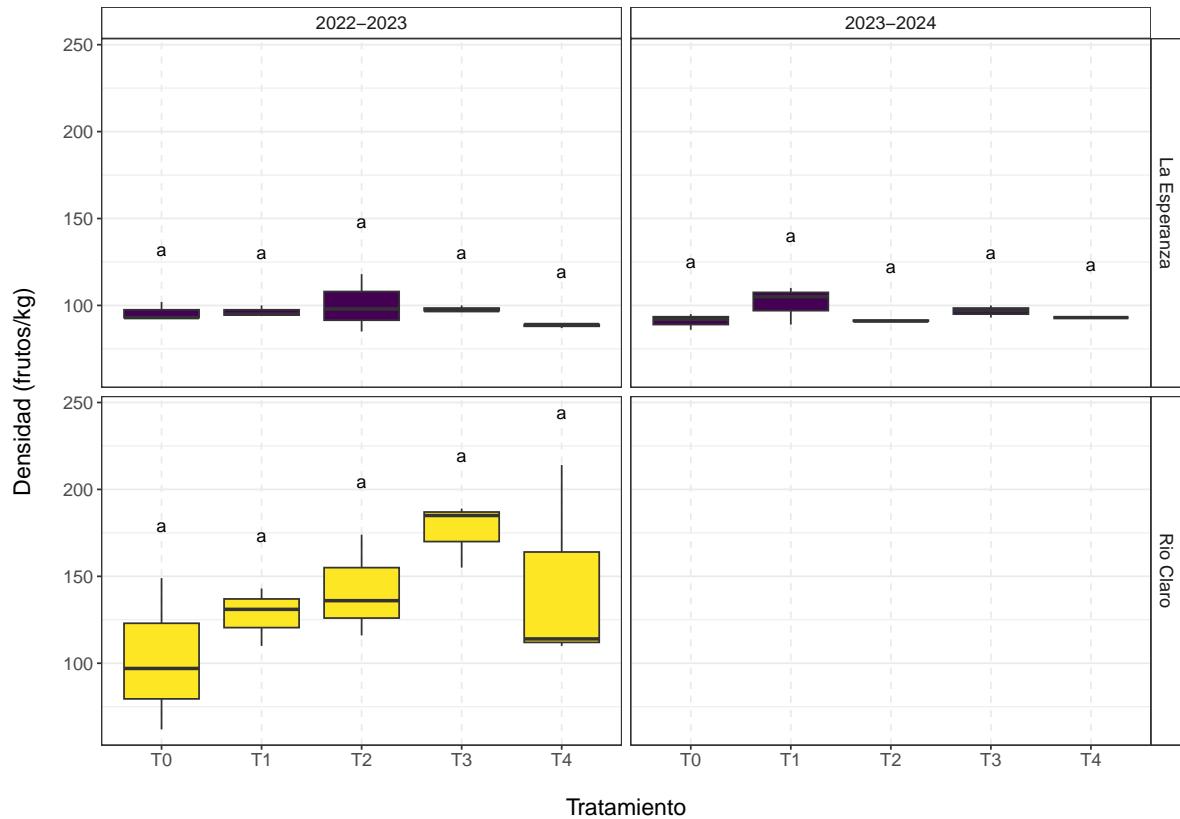
7 Por temporada



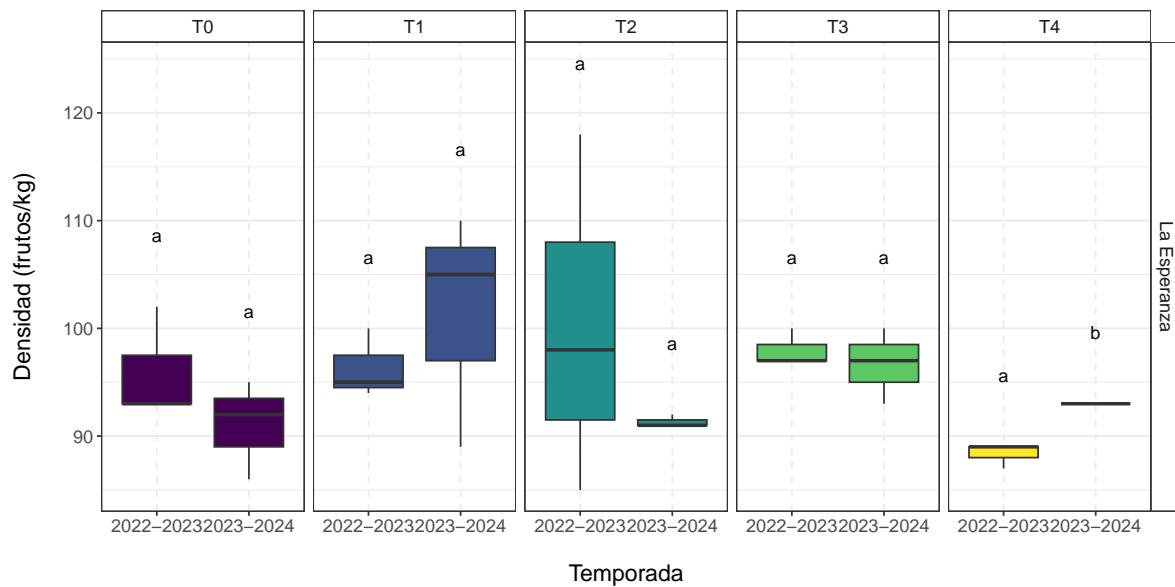
7.1 Densidad

Los resultados en la densidad muestran que, en La Esperanza, los valores fueron relativamente similares entre tratamientos y entre las temporadas, sin variaciones destacadas, lo que también ocurrió en T0. En Río Claro, se observaron mayores diferencias durante la temporada 2022-2023, donde T3 presentó valores más altos, superando los 200 frutos/kg en las tres unidades.

8 Por tratamiento



9 Por temporada



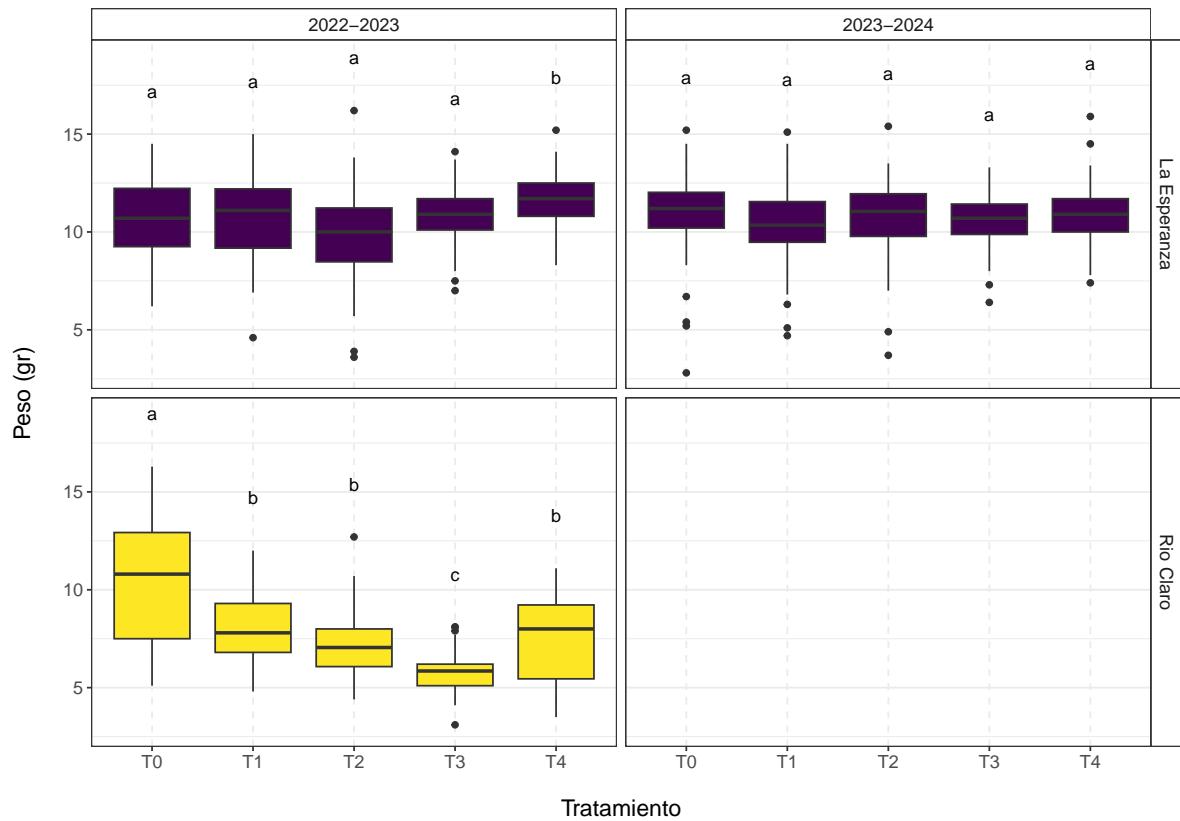
10 Calidad

10.1 Apariencia

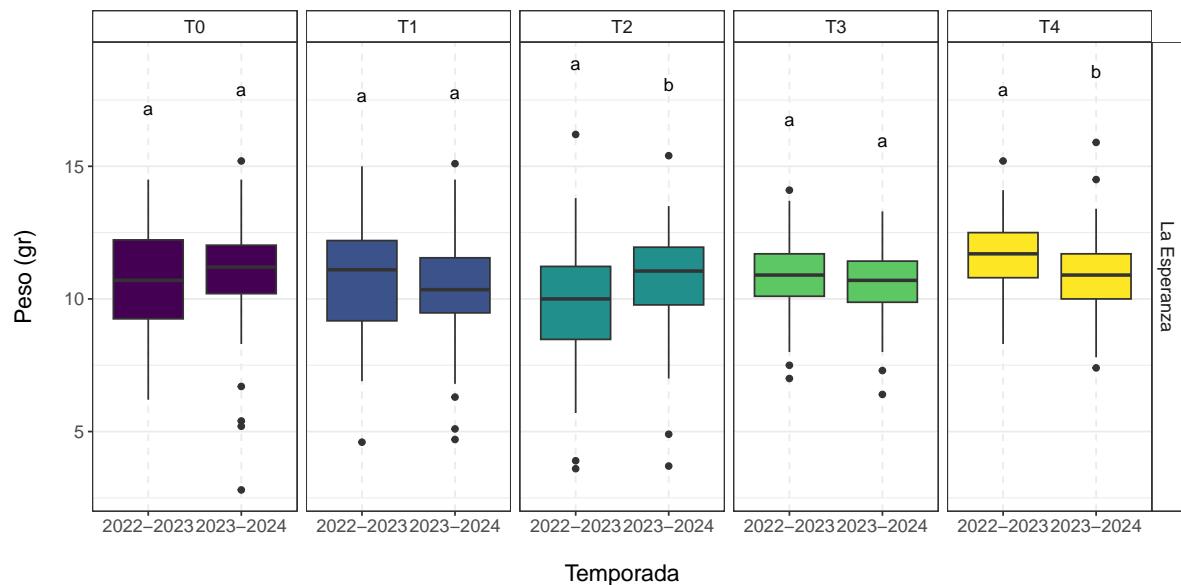
10.1.1 Peso

En La Esperanza, no se observaron diferencias significativas en el peso de las cerezas entre tratamientos en ninguna de las temporadas, salvo por T4 en la temporada 2022-2023 donde el peso fue mayor. En contraste, en Río Claro durante la temporada 2022-2023, el peso del fruto disminuyó significativamente en los tratamientos con restricción hídrica respecto al control (T0), con la reducción más pronunciada en T3. T4 mostró una recuperación parcial, aunque sin alcanzar los valores del control.

11 Por tratamiento



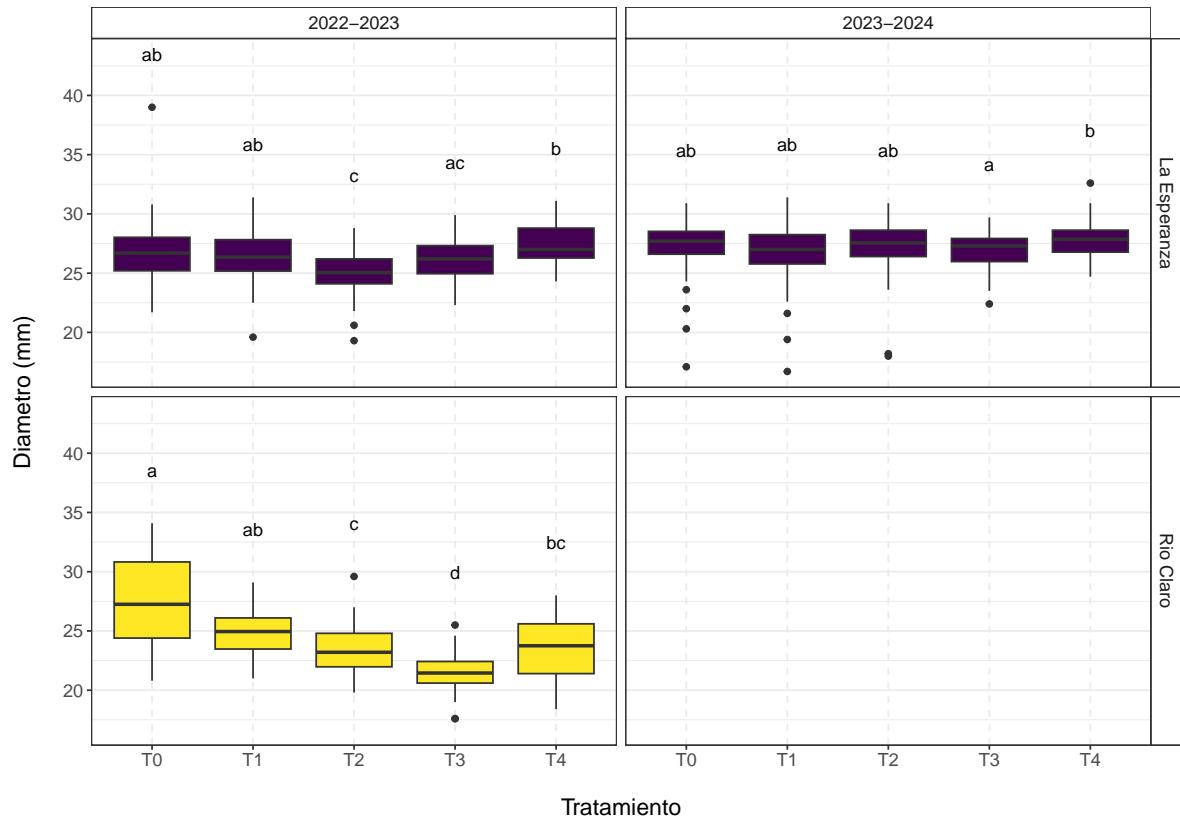
12 Por temporada



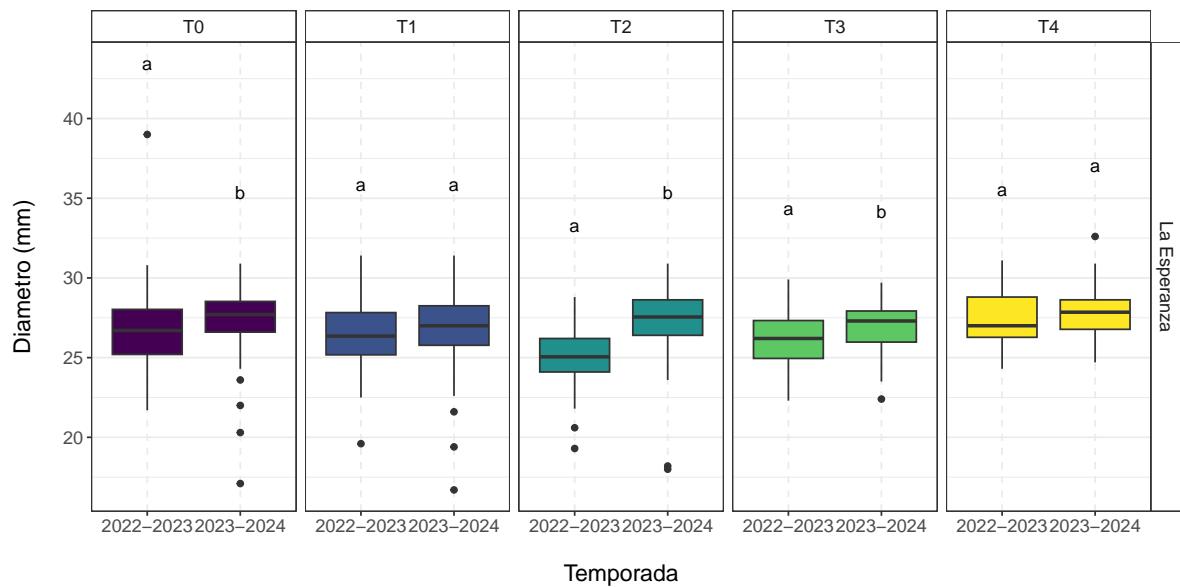
12.0.1 Diametro

En La Esperanza, los tratamientos con déficit hídrico mostraron algunas diferencias significativas en el diámetro del fruto en 2022-2023, donde T2 presentó menores valores que T0, mientras que T4 tuvo diámetros ligeramente mayores que T2 y T3. En 2023-2024, no hubo diferencias significativas entre tratamientos, excepto por T4, que mostró un leve incremento respecto al resto. En Río Claro, los tratamientos T2 al T4 reflejaron una disminución significativa del diámetro del fruto en 2022-2023.

13 Por tratamiento



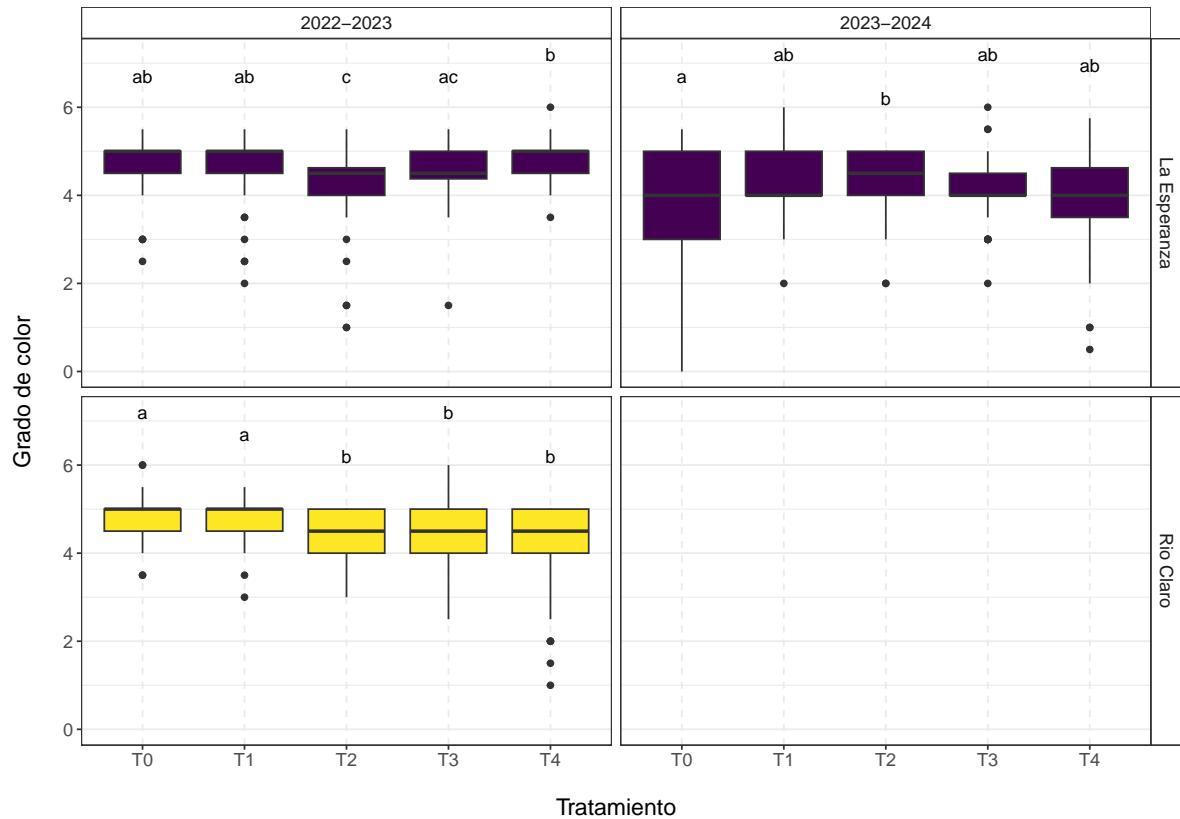
14 Por temporada



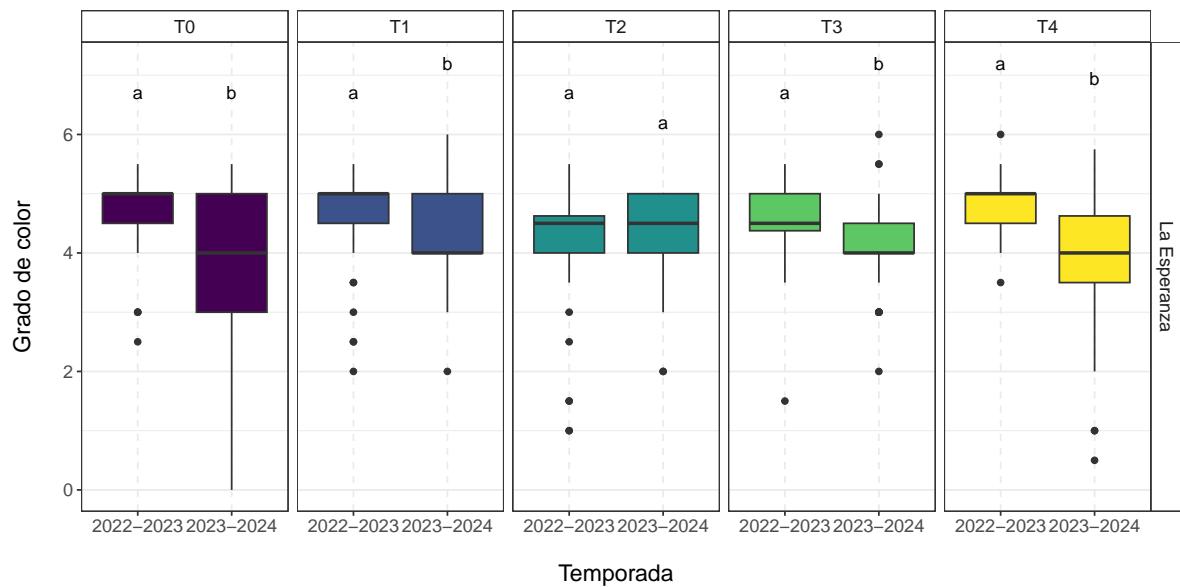
14.1 Color

En La Esperanza, se presentaron similitudes en el grado de color con T0 en todos los casos, salvo T2 y T4 en la temporada 2022-2023, y T2 en la segunda temporada. En Río Claro, T2, T3 y T4 presentaron diferencias significativas con T0.

15 Por tratamiento



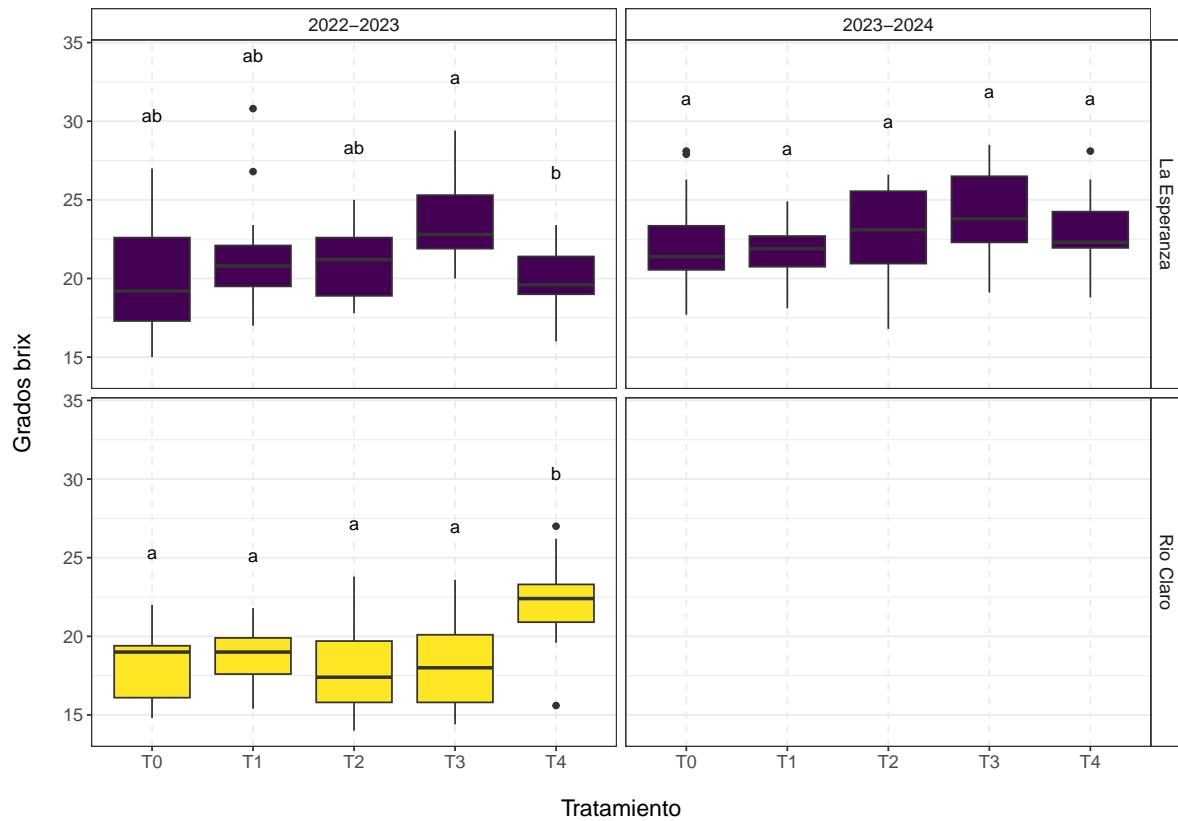
16 Por temporada



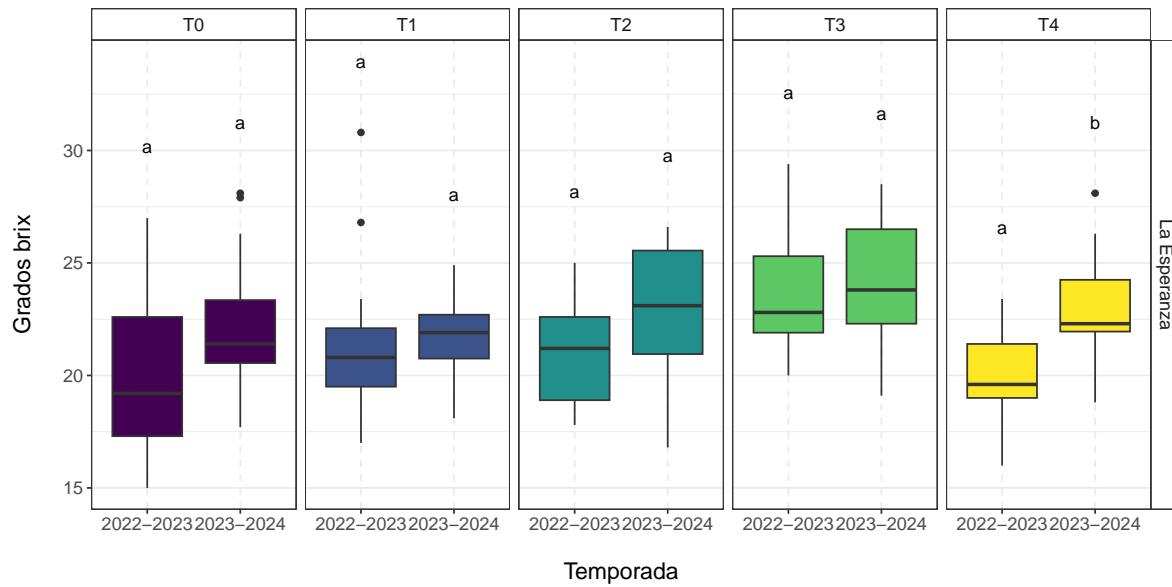
16.1 Contenido de azúcar

En La Esperanza, los sólidos solubles de los tratamientos experimentales no presentaron diferencias significativas respecto a T0, solo entre T3 y T4, mientras que en la segunda temporada no hubo entre ningún tratamiento. En Río Claro, en 2022-2023, T4 presentó valores significativamente mayores que el resto de los tratamientos, los cuales no mostraron diferencias entre sí.

17 Por tratamiento



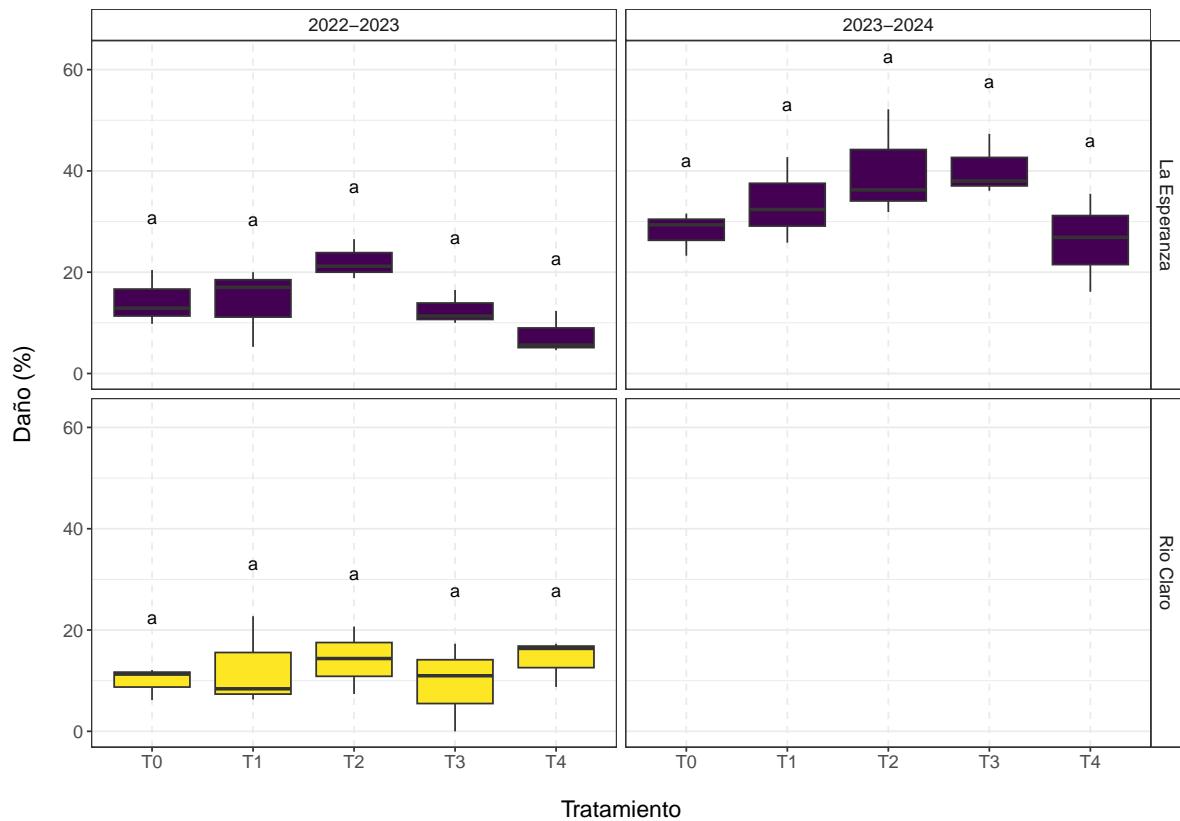
18 Por temporada



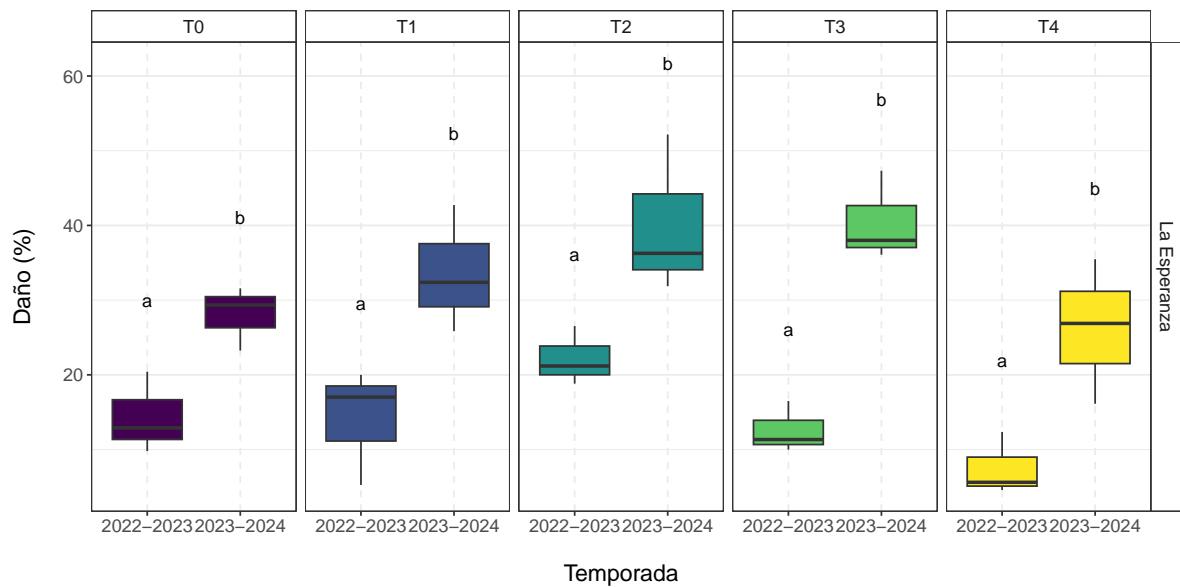
18.1 Daño

Respecto al porcentaje de frutos dañados del total de las muestras analizadas, fue posible concluir que no existieron diferencias significativas entre ningún grupo, para todos los casos. Sin embargo, fue posible evidenciar un aumento significativo de frutos dañados trasnversal entre todos los tratamientos para la segunda temporada en La Esperanza.

19 Por tratamiento



20 Por temporada



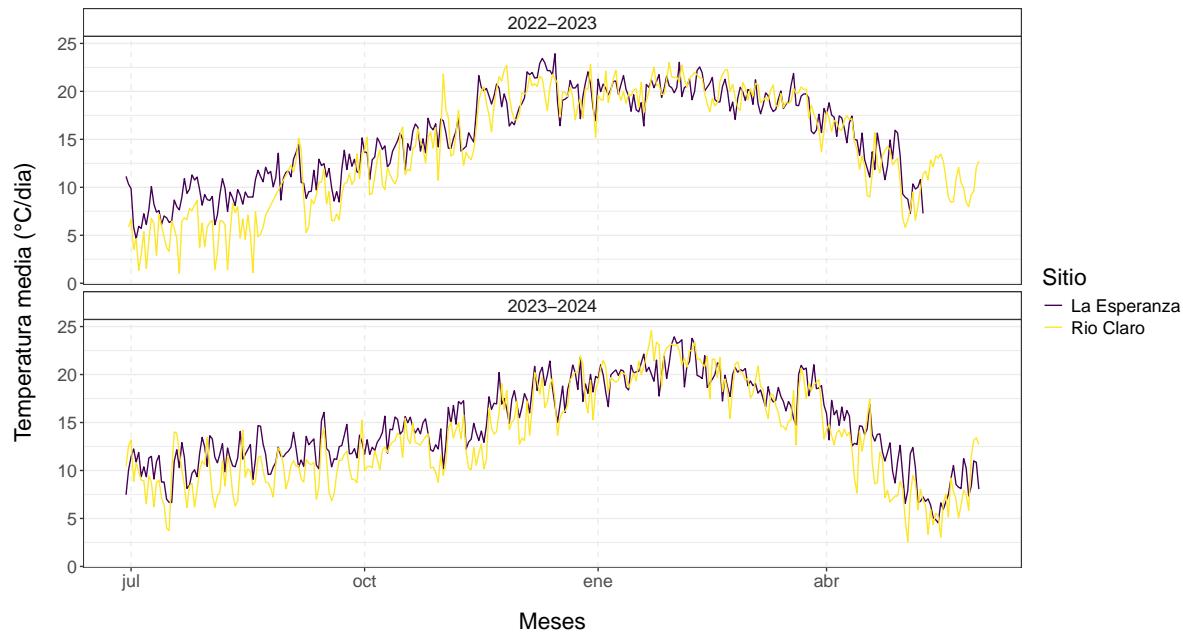
Parte III

Variables meteorológicas

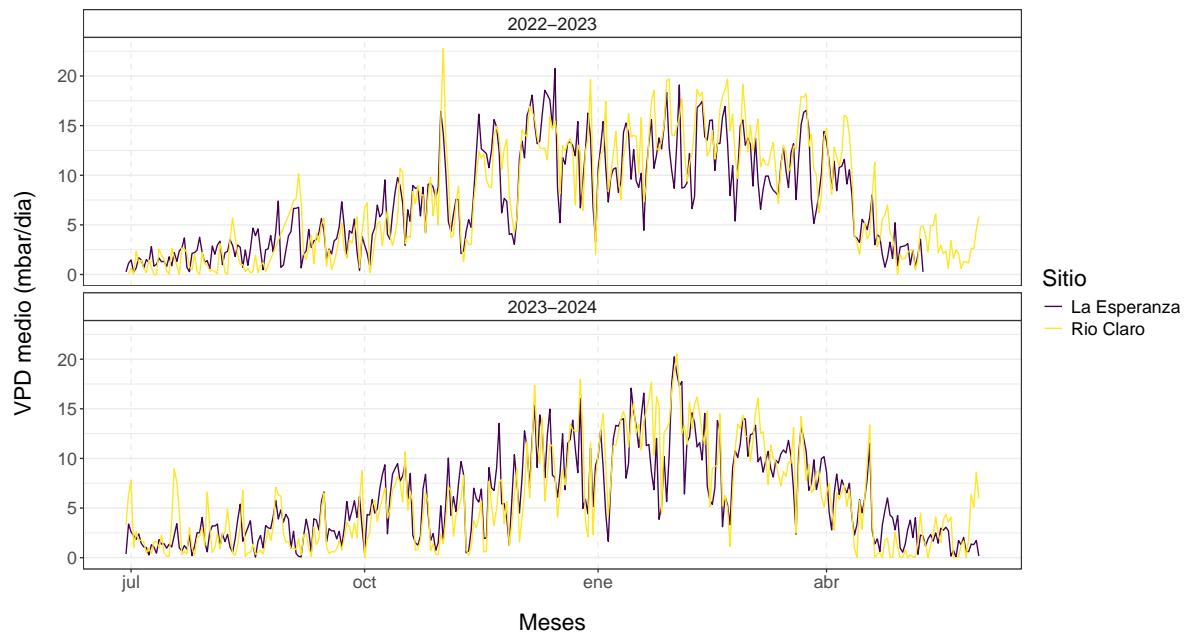
21 Clima

Las variables meteorológicas utilizadas en el desarrollo del modelo de potencial se obtuvieron a partir de estaciones meteorológicas automáticas en ambos huertos, las cuales registraron datos cada 15 minutos utilizando el modelo ATMOS-41 del grupo METER. Estas variables fueron temperatura (T°), humedad relativa (HR), déficit de presión de vapor (DPV), precipitación (PP) y evapotranspiración de referencia (ET0).

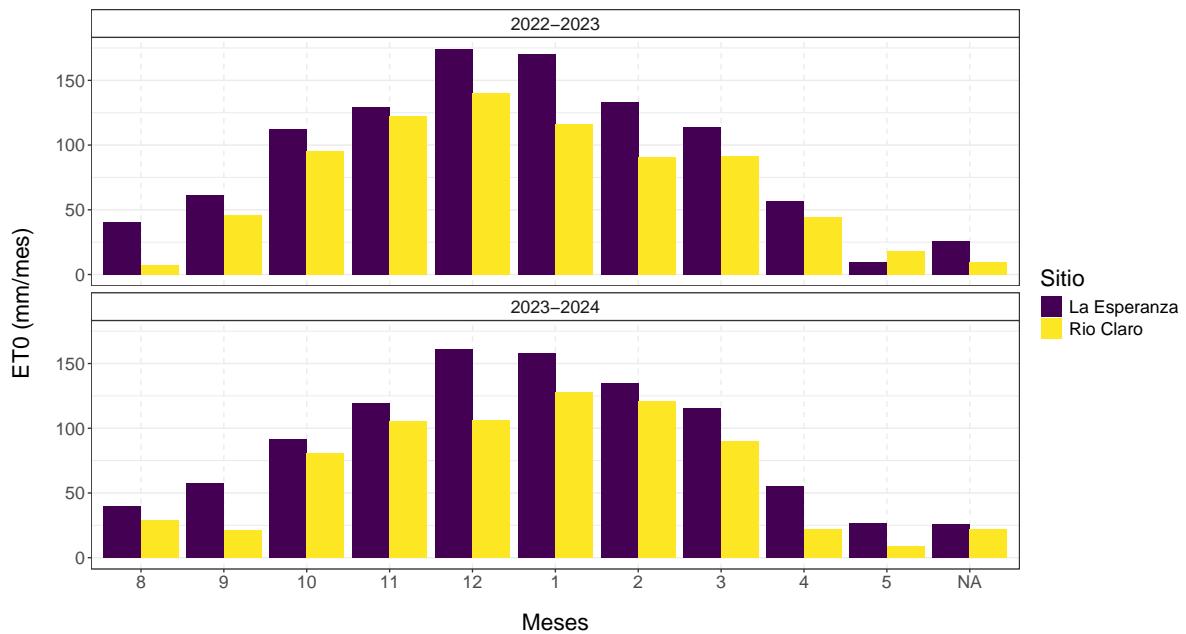
22 Temperatura



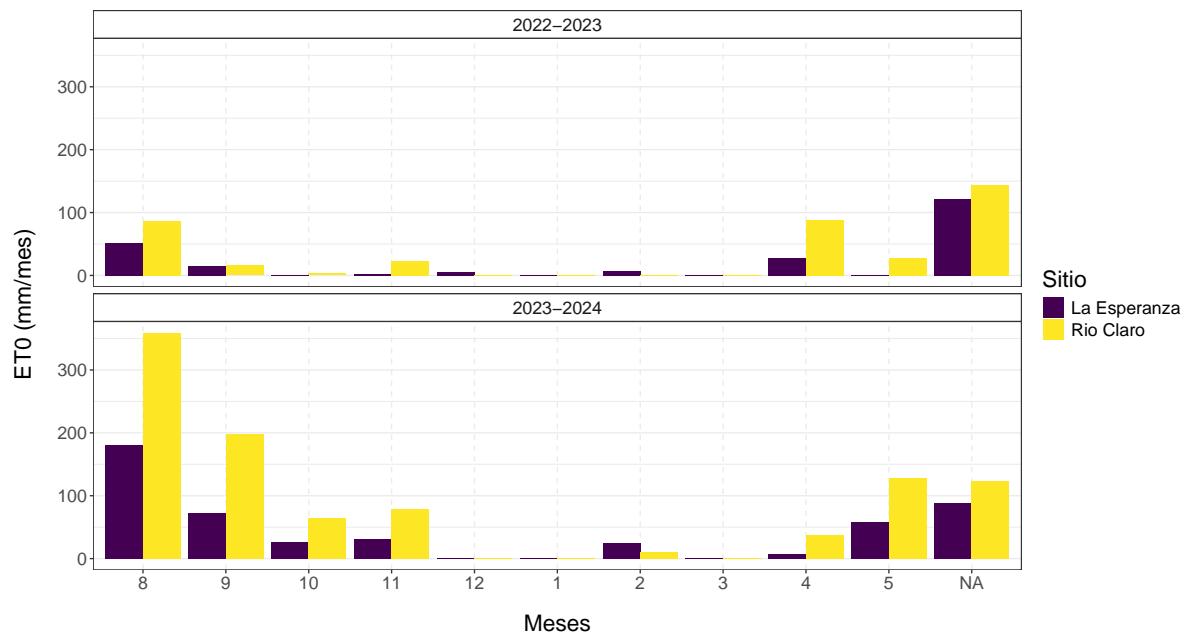
23 Déficit de presión de vapor (VPD)



24 Evapotranspiración de referencia (ET0)



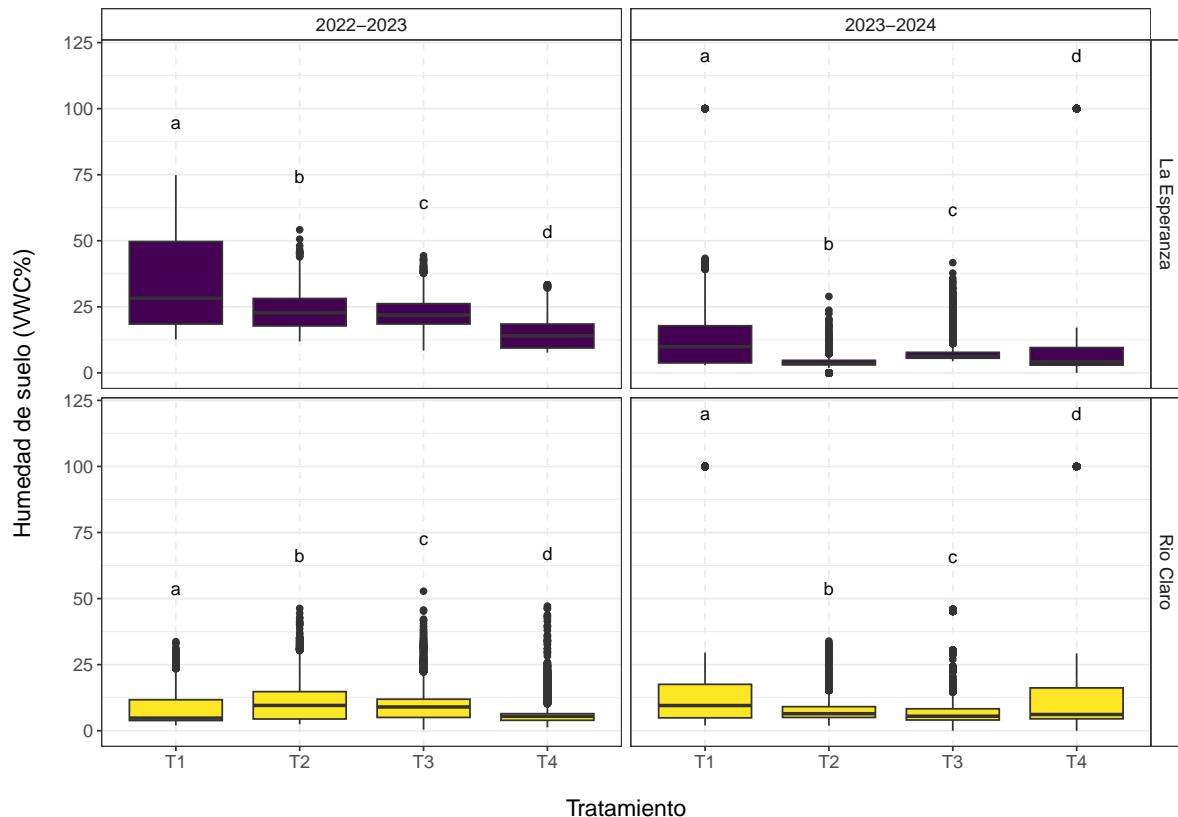
25 Precipitación



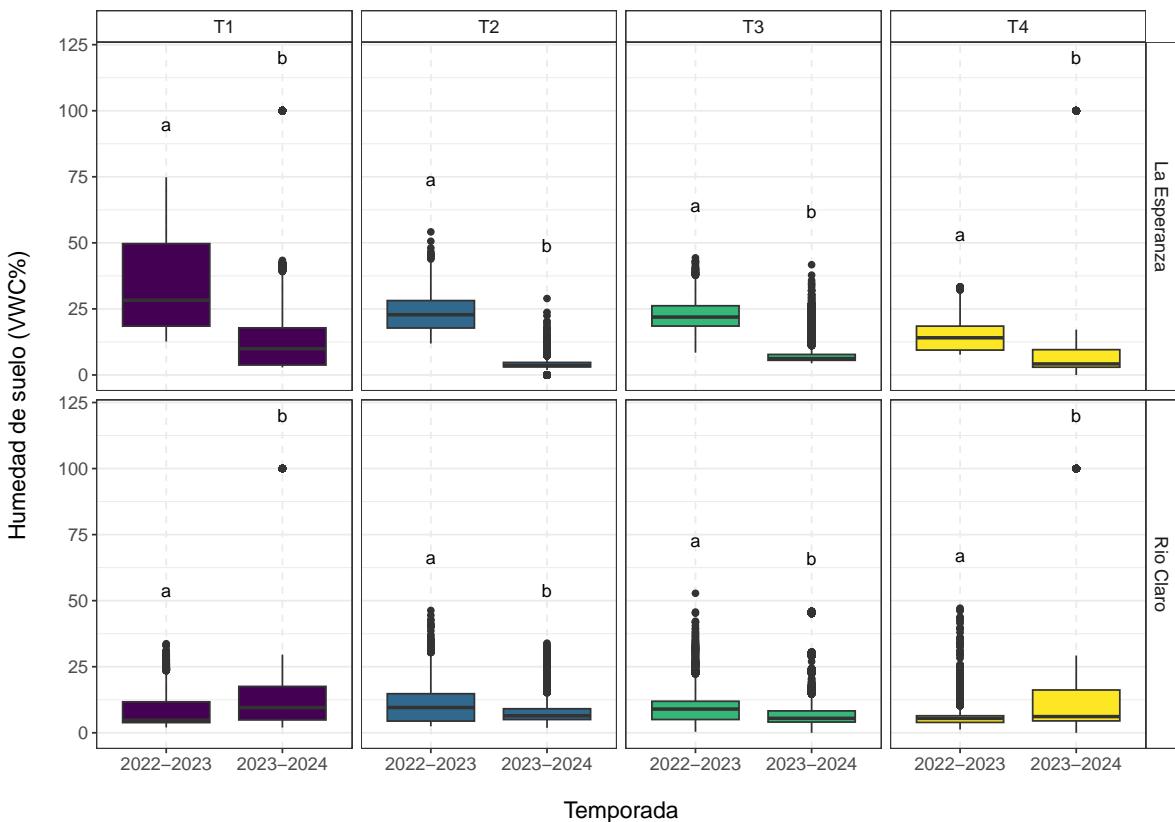
26 Humedad de suelo

Además de las variables meteorológicas, también se recopilaron datos de humedad del suelo. Para esto, se utilizaron sensores de humedad del suelo Water Scout SM100 (Spectrum Technologies, Inc.), los cuales miden en tiempo real el contenido volumétrico de agua (VWC). Estos sensores se instalaron a 15 cm de profundidad bajo cada árbol de los tratamientos

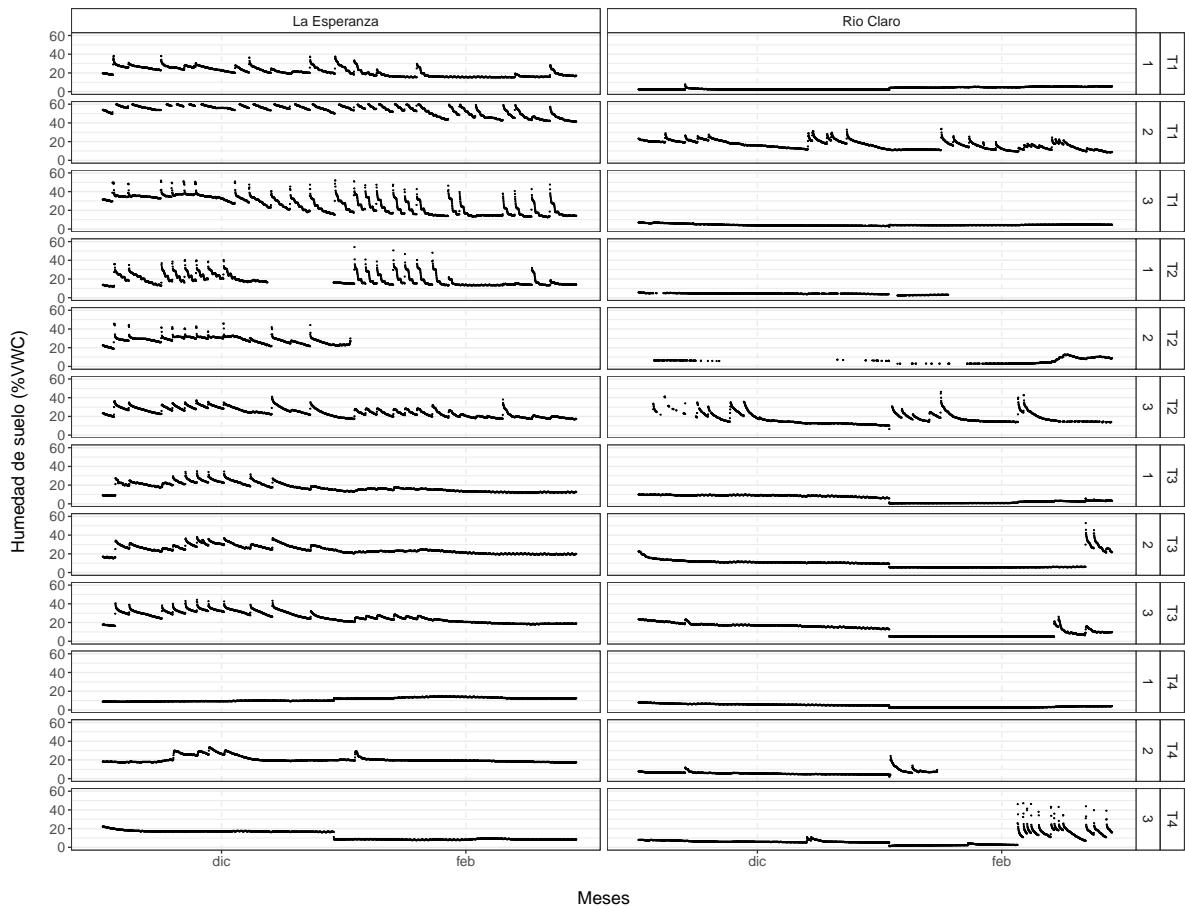
27 Por tratamiento



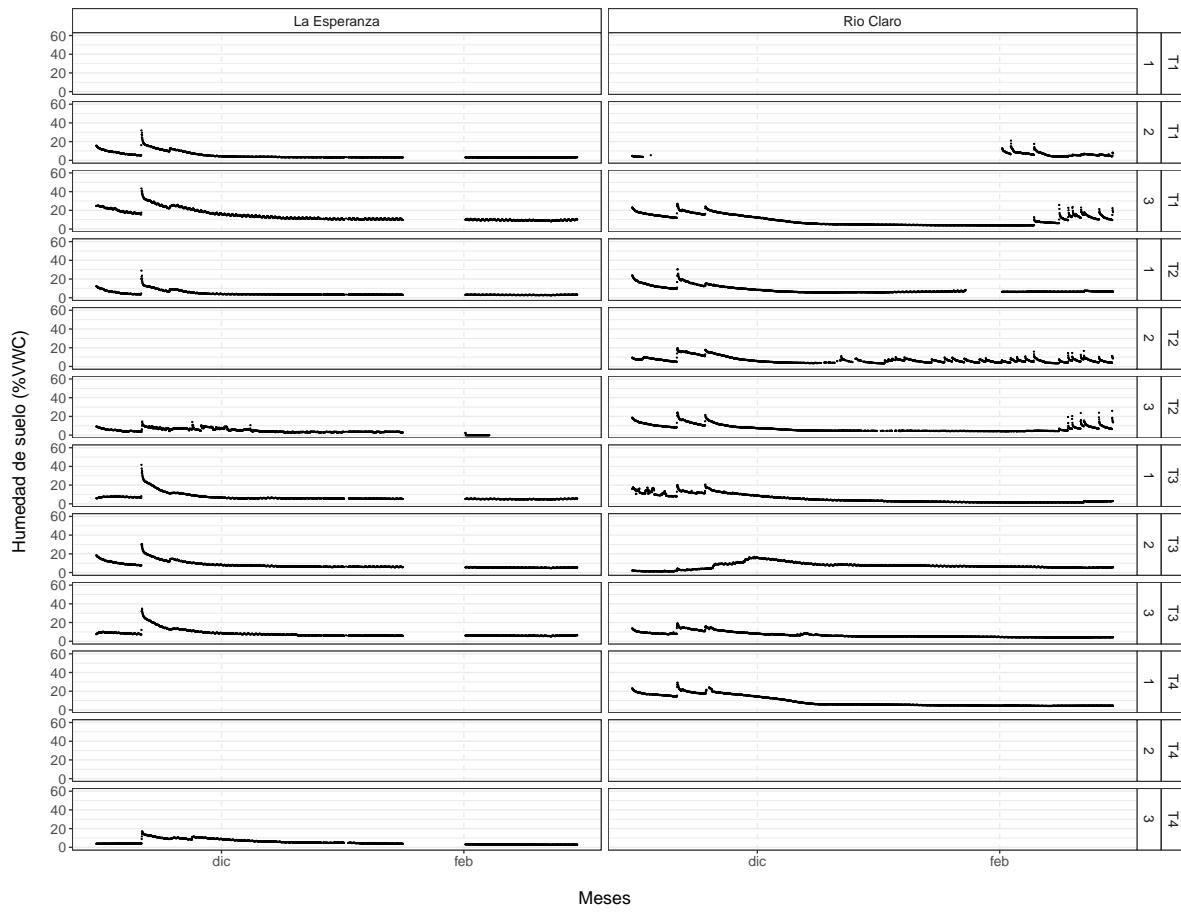
28 Por temporada



29 Serie temporal 2022-2023



30 Serie temporal 2023-2024



Parte IV

Parámetros fisiológicos

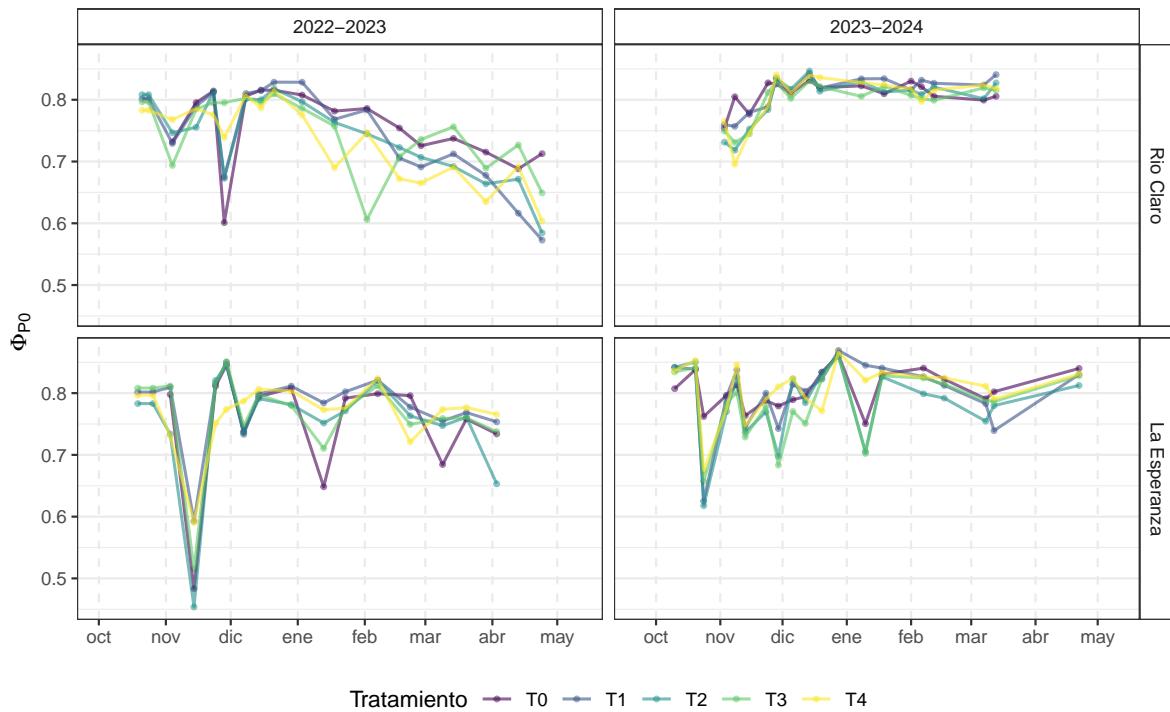
31 Parámetros fisiológicos

Los siguientes gráficos muestran la distribución durante el mes, para cada tratamiento, sitio y temporada, de los tres parámetros fisiológicos seleccionados del estudio. Estos fueron la Máxima Eficiencia Quántica del Fotosistema II (Φ_{P0}), el Potencial Hídrico Xilemático (Ψ_s) y el Índice de Área Foliar (LAI).

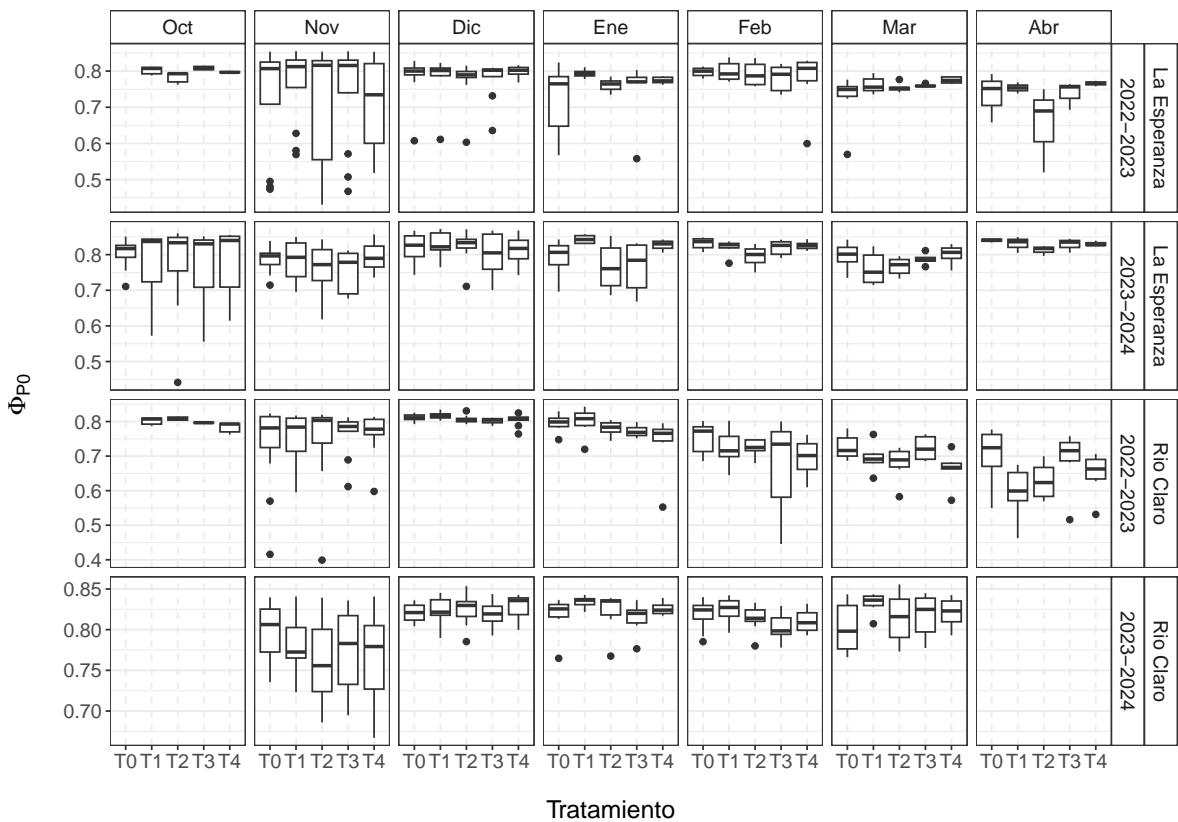
31.1 Fluorescencia

En general, los valores de Φ_{P0} presentan fluctuaciones a lo largo del tiempo sin una tendencia clara en la mayoría de los casos. Sin embargo, en la temporada 2022-2023 de Río Claro, se observa una disminución progresiva en todos los tratamientos. Se registran descensos marcados en noviembre y diciembre, seguidos de una relativa estabilidad en los meses siguientes. No se evidencian diferencias consistentes entre los tratamientos, ya que las curvas se superponen en la mayor parte del período evaluado. Sin embargo, observando la distribución mensual de los valores, es posible evidenciar que T2 y T4 suelen presentar valores menores en comparación con los demás tratamientos, especialmente a partir de enero y febrero. En cuanto a las diferencias con T0, este último muestra valores más altos en la mayoría de los casos.

32 Series temporales



33 Distribución por mes



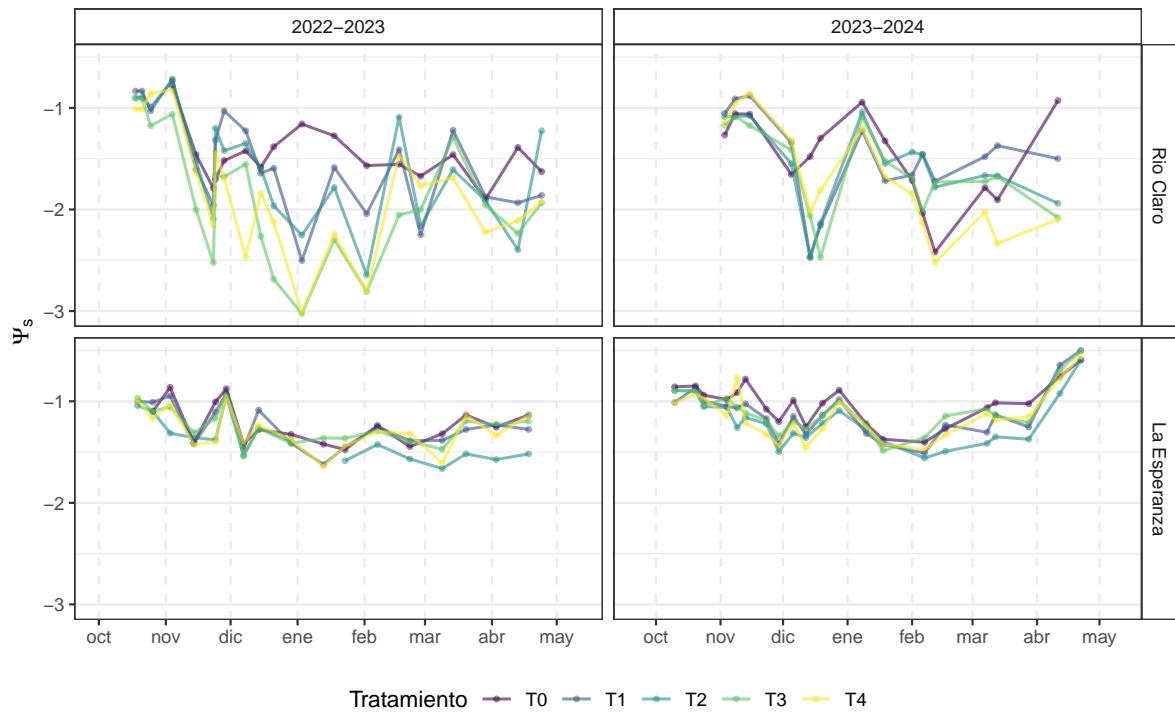
33.1 Potencial

Los valores de Ψ_s presentan variaciones a lo largo del tiempo con diferencias entre localidades y temporadas. En Río Claro, durante la temporada 2022-2023, se observa una disminución de Ψ_s desde octubre hasta diciembre, seguida de una alta variabilidad en los meses siguientes. Un patrón similar, aunque con menor amplitud, se presenta en 2023-2024, con una caída inicial y fluctuaciones posteriores. En La Esperanza, los valores de Ψ_s se mantienen más estables en ambas temporadas, con una ligera disminución en verano y un aumento hacia mayo. No

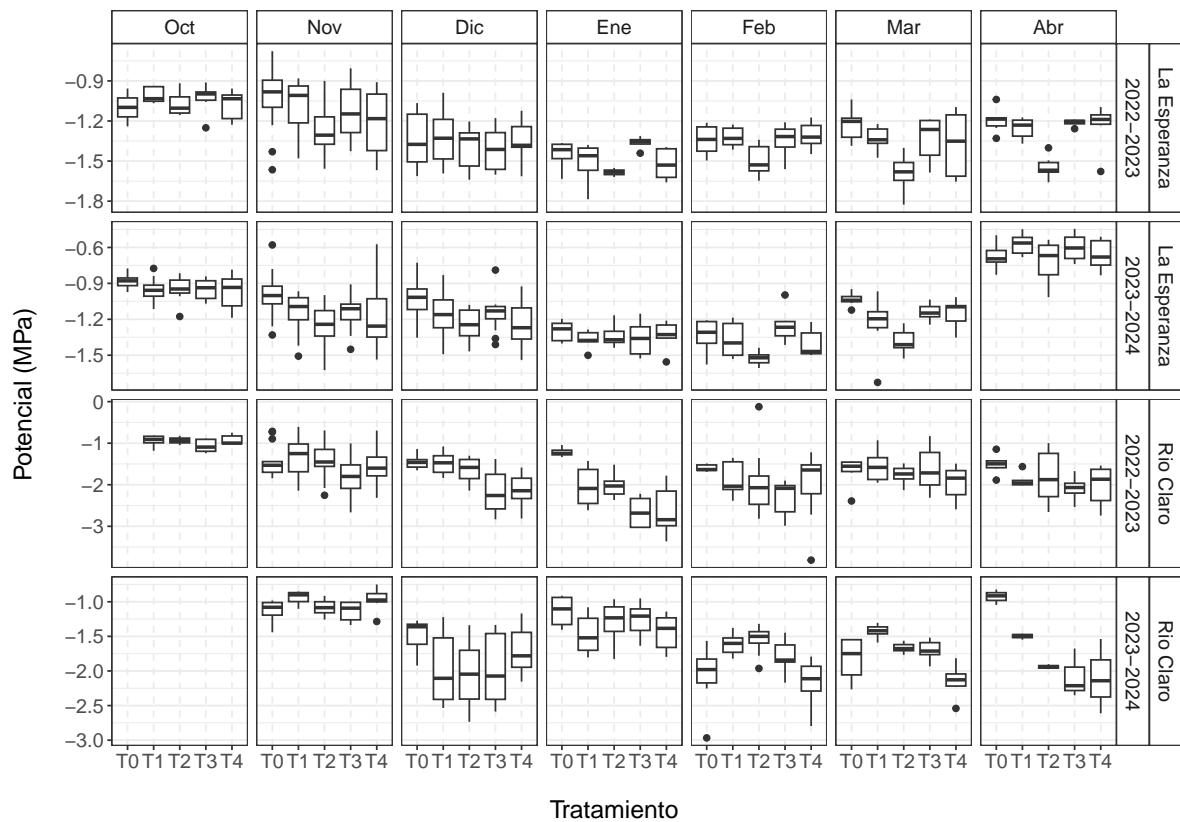
se observan diferencias marcadas entre los tratamientos, ya que las curvas siguen tendencias similares a lo largo del período evaluado.

Respecto a la distribución mensual, en Rio Claro, los tratamientos con déficit hídrico presentan valores inferiores al tratamiento control, con una diferencia más pronunciada al final de la segunda temporada. En cambio, en La Esperanza, las diferencias son más sutiles y poco consistentes entre los meses.

34 Series temporales



35 Distribución por mes

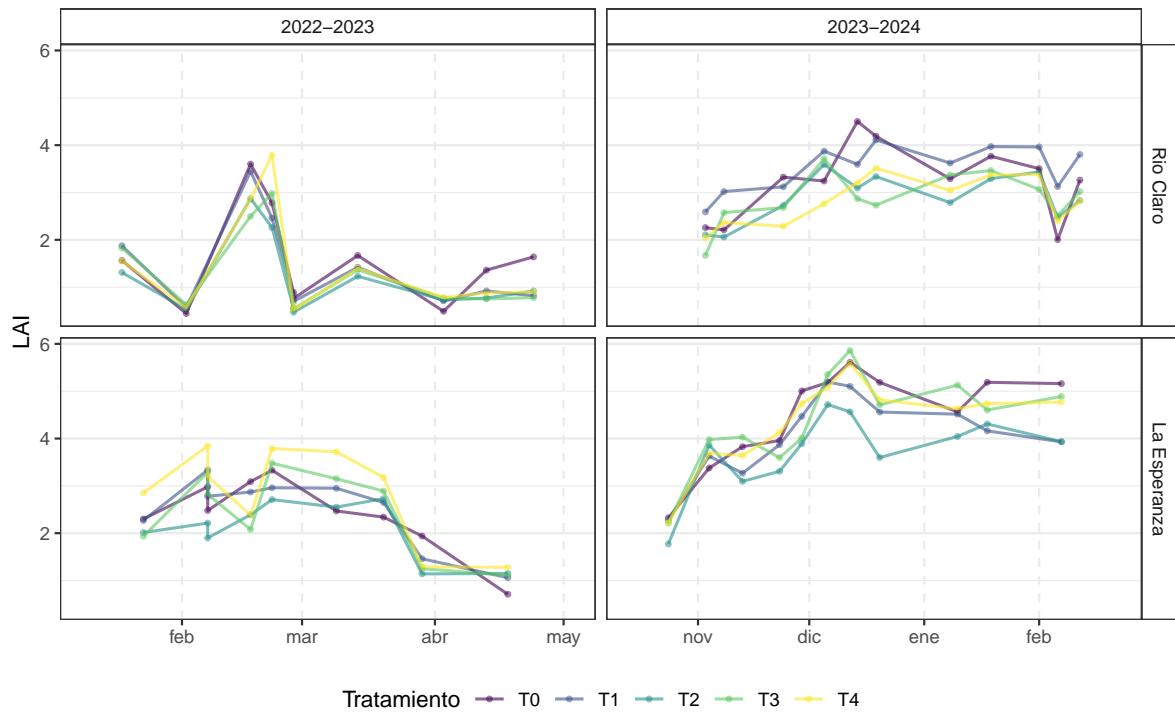


35.1 LAI

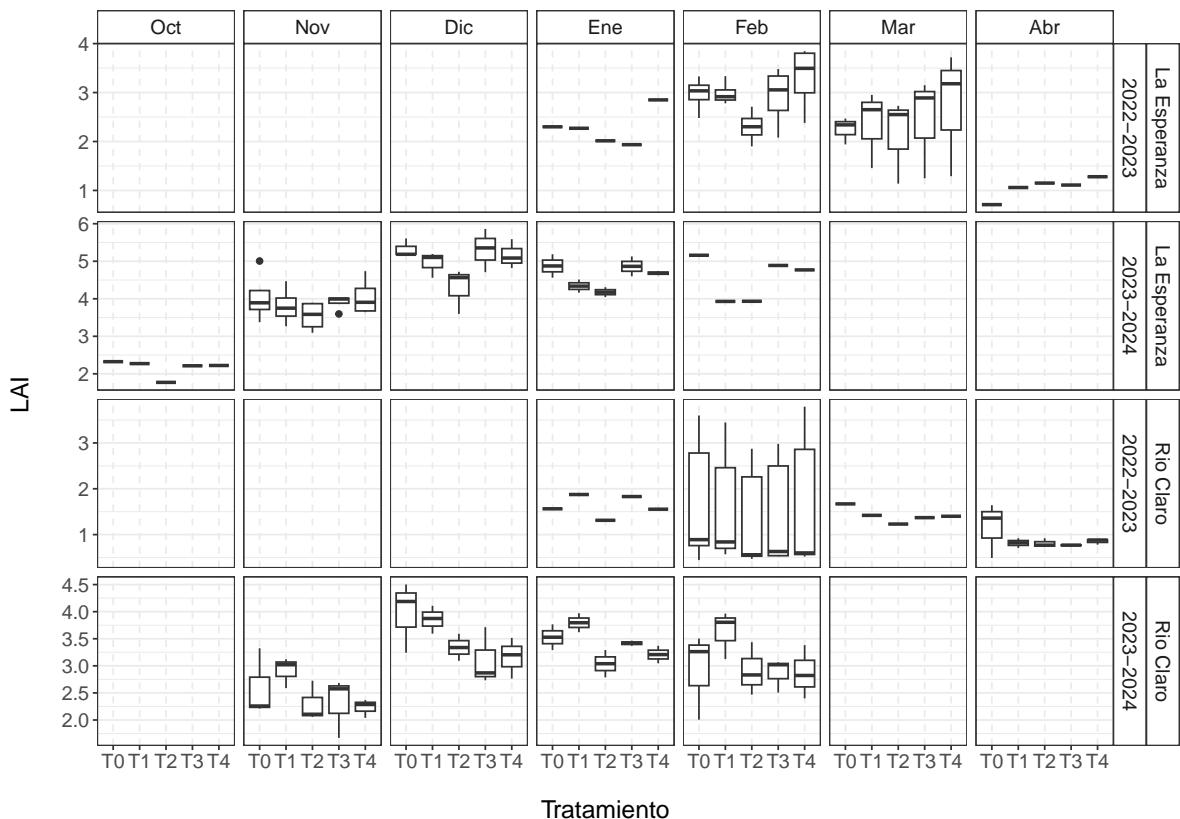
Los valores de LAI muestran patrones diferenciados entre temporadas y localidades. En Río Claro, la temporada 2022-2023 presenta un aumento pronunciado en enero, seguido de una caída y relativa estabilidad en los meses posteriores. En 2023-2024, se observa una tendencia ascendente más sostenida hasta febrero, con una leve disminución al final del período. En La Esperanza, la temporada 2022-2023 exhibe fluctuaciones en los primeros meses y una reducción marcada desde abril, mientras que en 2023-2024, el LAI aumenta progresivamente

hasta febrero. No se evidencian diferencias consistentes entre tratamientos, ya que las curvas muestran tendencias similares en ambos sitios.

36 Series temporales



37 Distribución por mes



38 Curvas Presión-volumen

Los datos utilizados para las curvas Presión-volumen corresponden a mediciones de potencial hídrico xilemático y peso en hojas de distintas unidades de los tratamientos experimentales, según la metodología descrita por Halbritter et al. (2020). El punto de pérdida de turgor (TLP) se estima como el último punto de la curva del Ψ inverso en función del RWD ($1 - \text{RWC}$) antes de comenzar su fracción lineal, como se muestra en la siguiente figura.

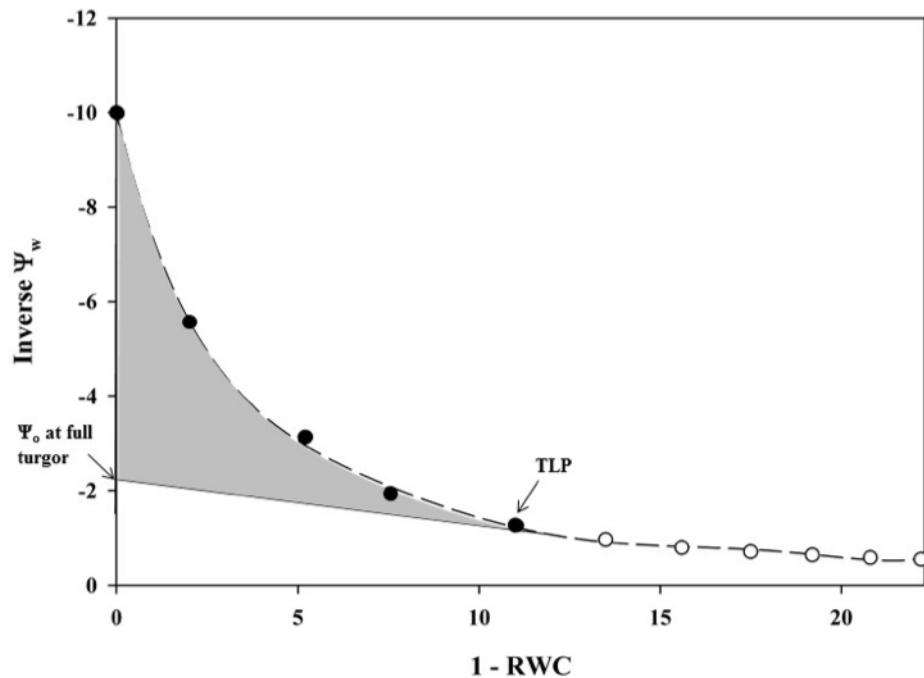
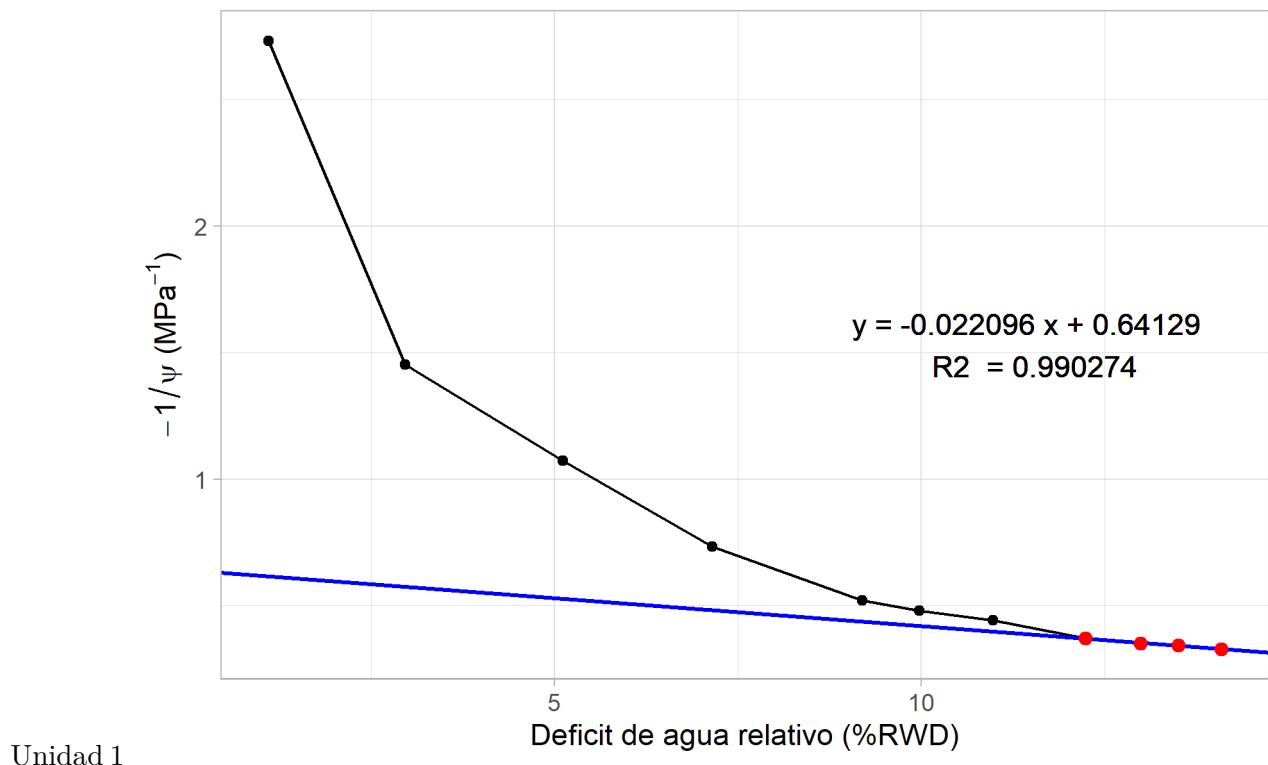


Figura 38.1: Ejemplo de una curva presión-volumen. Los círculos llenos representan las primeras 5 mediciones iterativas; los círculos abiertos representan las últimas 6 mediciones. La porción lineal (línea sólida) muestra el potencial osmótico (Ψ_o), la porción curva (línea discontinua) es el potencial hídrico antes del punto de pérdida de turgencia (TLP), y el área sombreada es el potencial de turgencia (Ψ_p). Fuente: Halbritter et al. (2020).

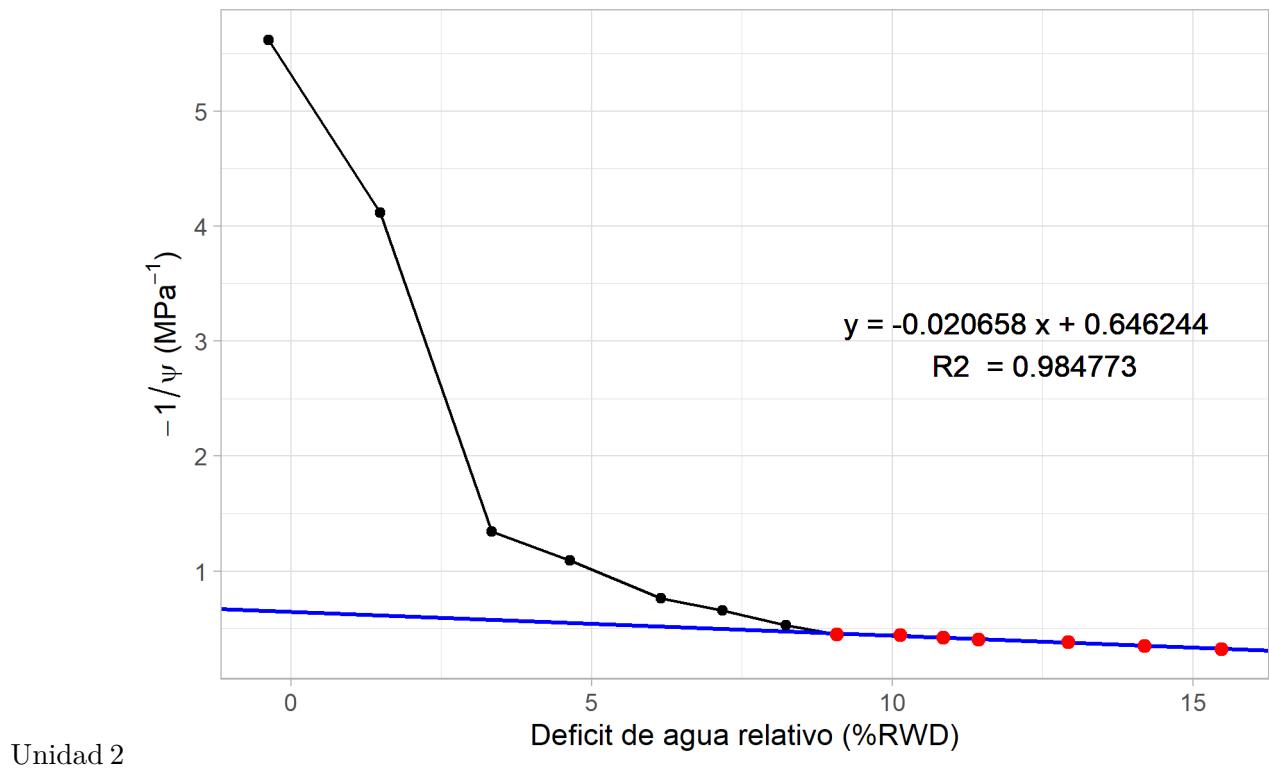
En base a esta misma metodología, a continuación se presentan las curvas presión-volumen de cada unidad medida.

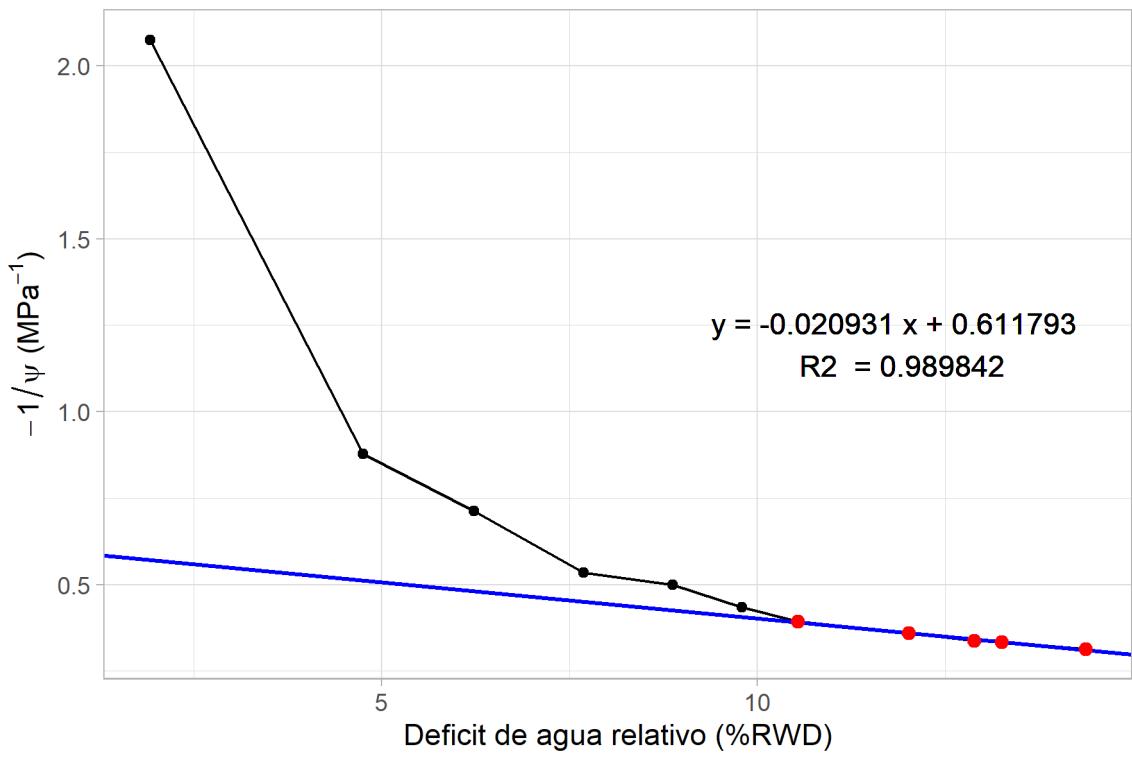
38.1 La Esperanza

39 Tratamiento 0 (control)



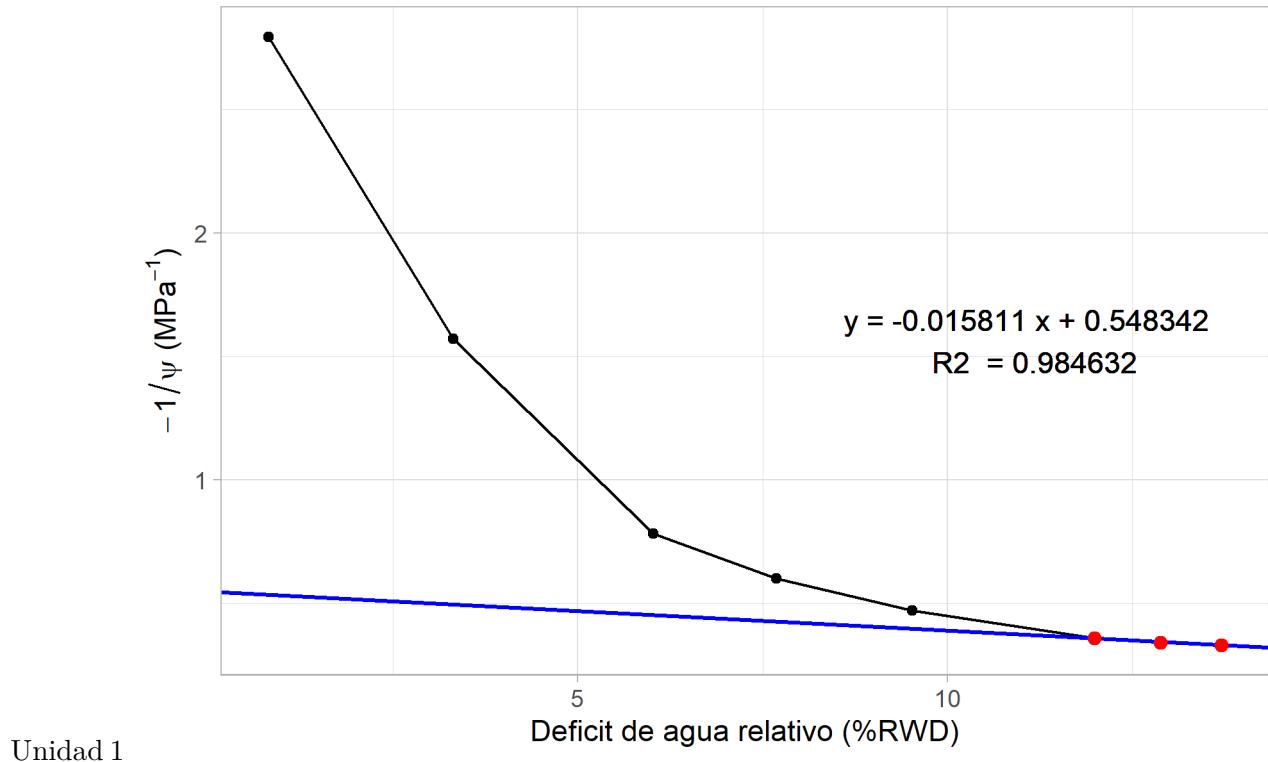
Unidad 1

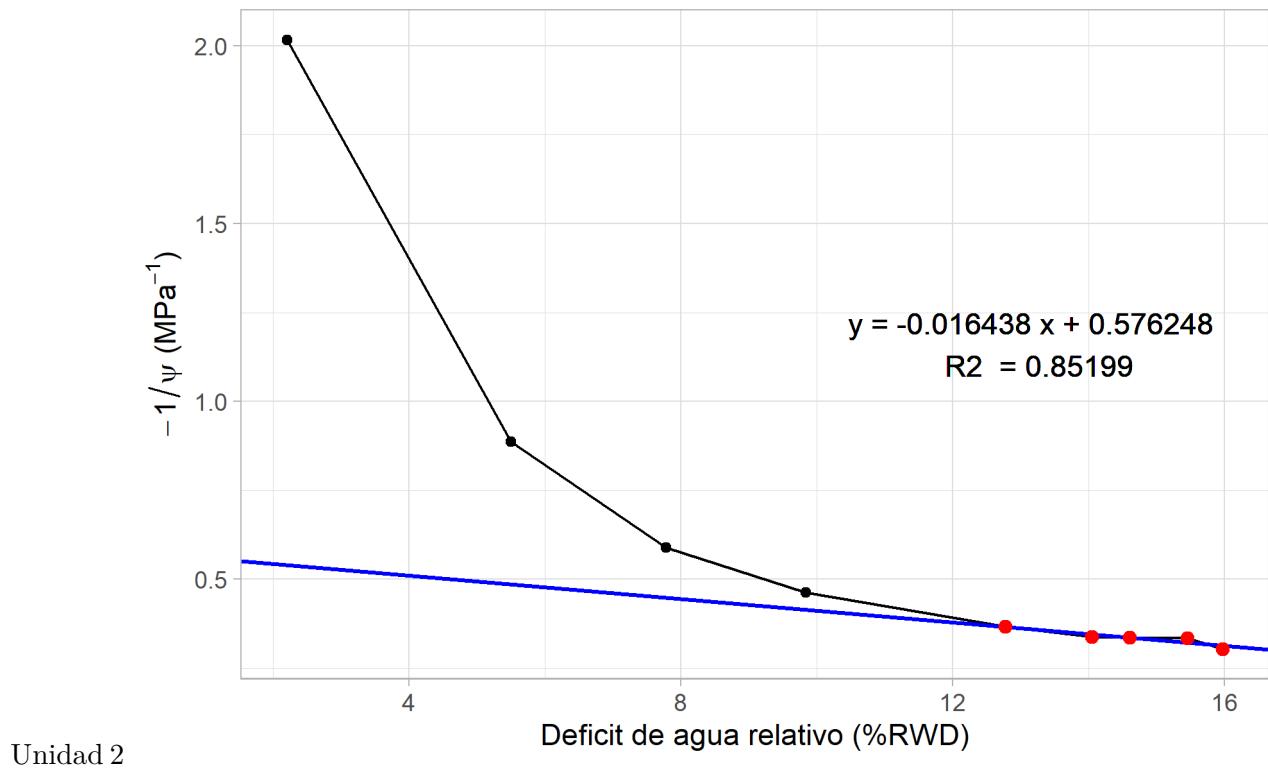


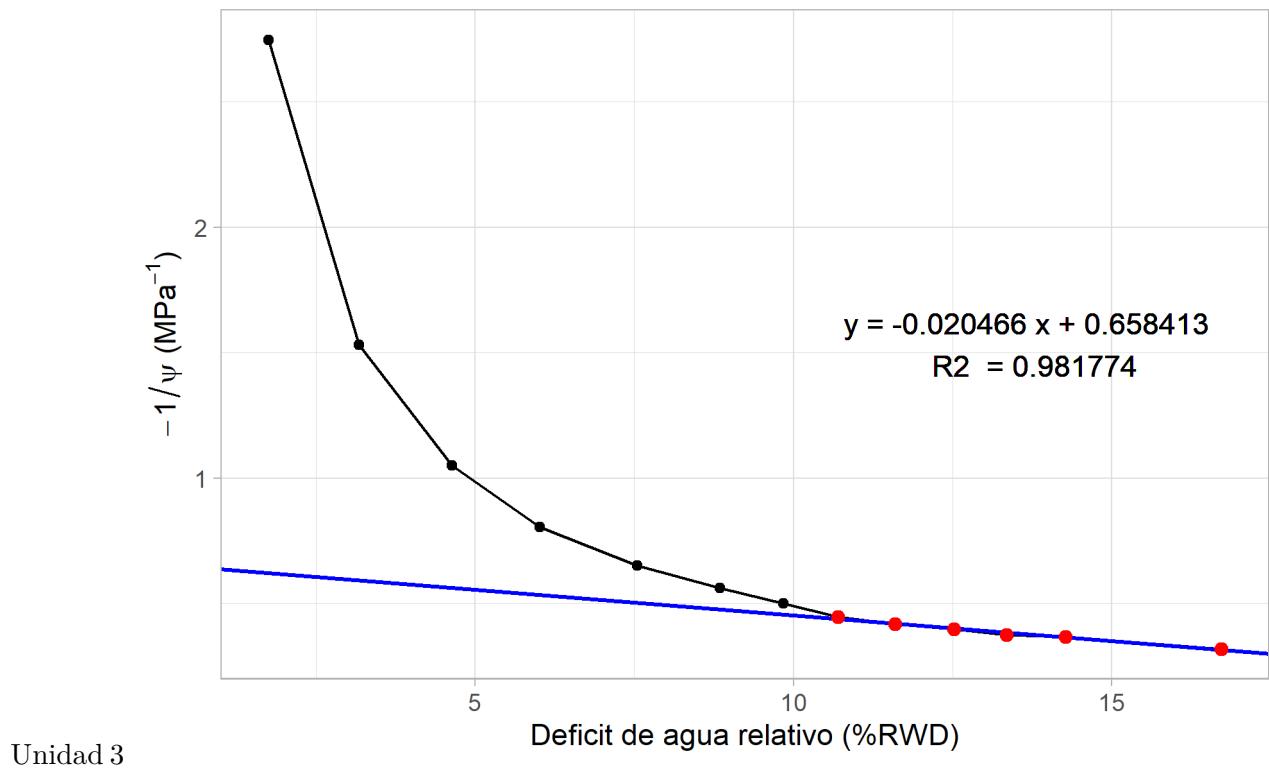


Unidad 3

40 Tratamiento 4



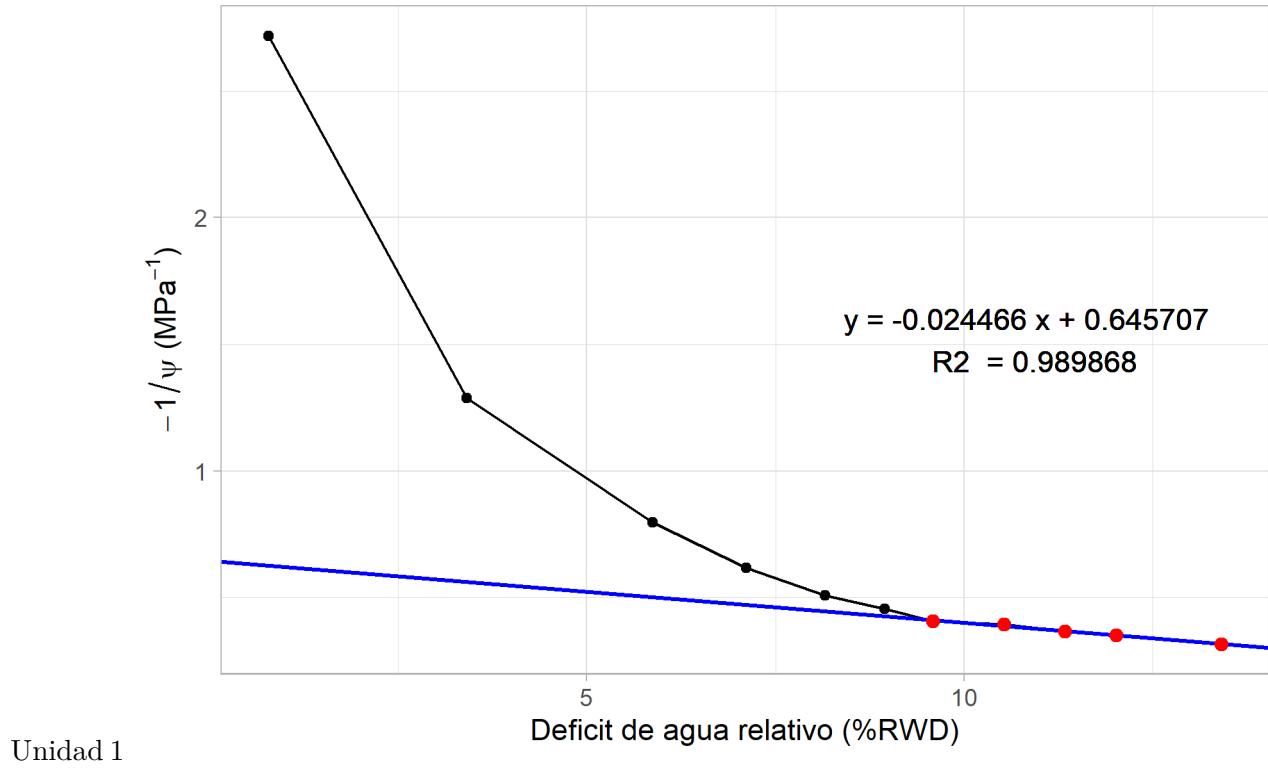


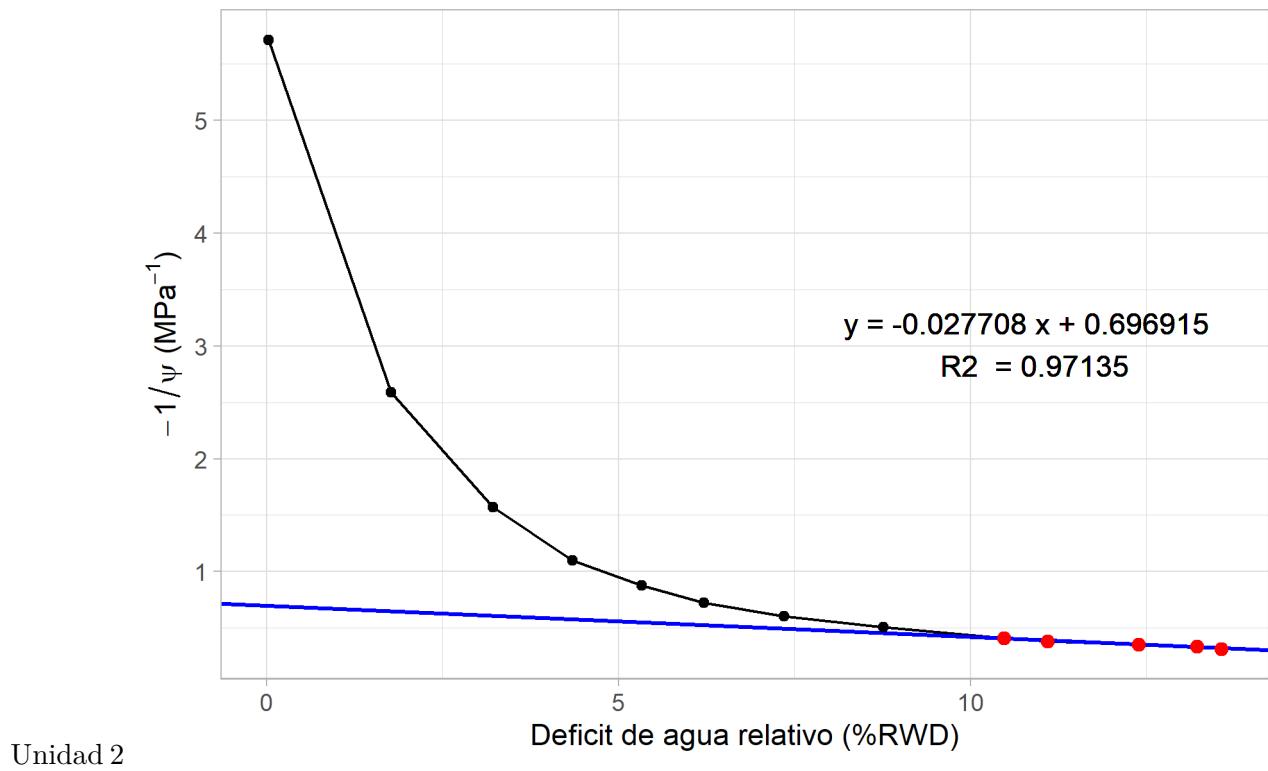


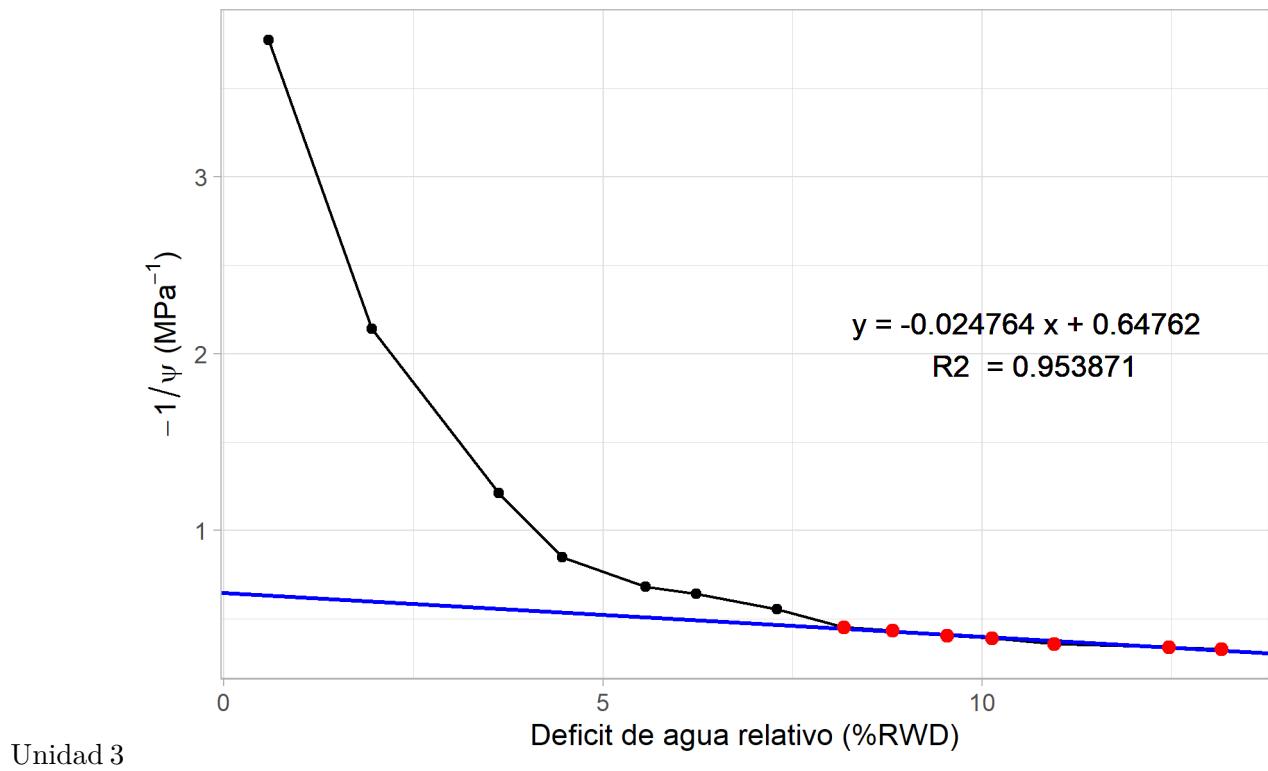
Unidad 3

40.1 Rio Claro

41 Tratamiento 0 (control)

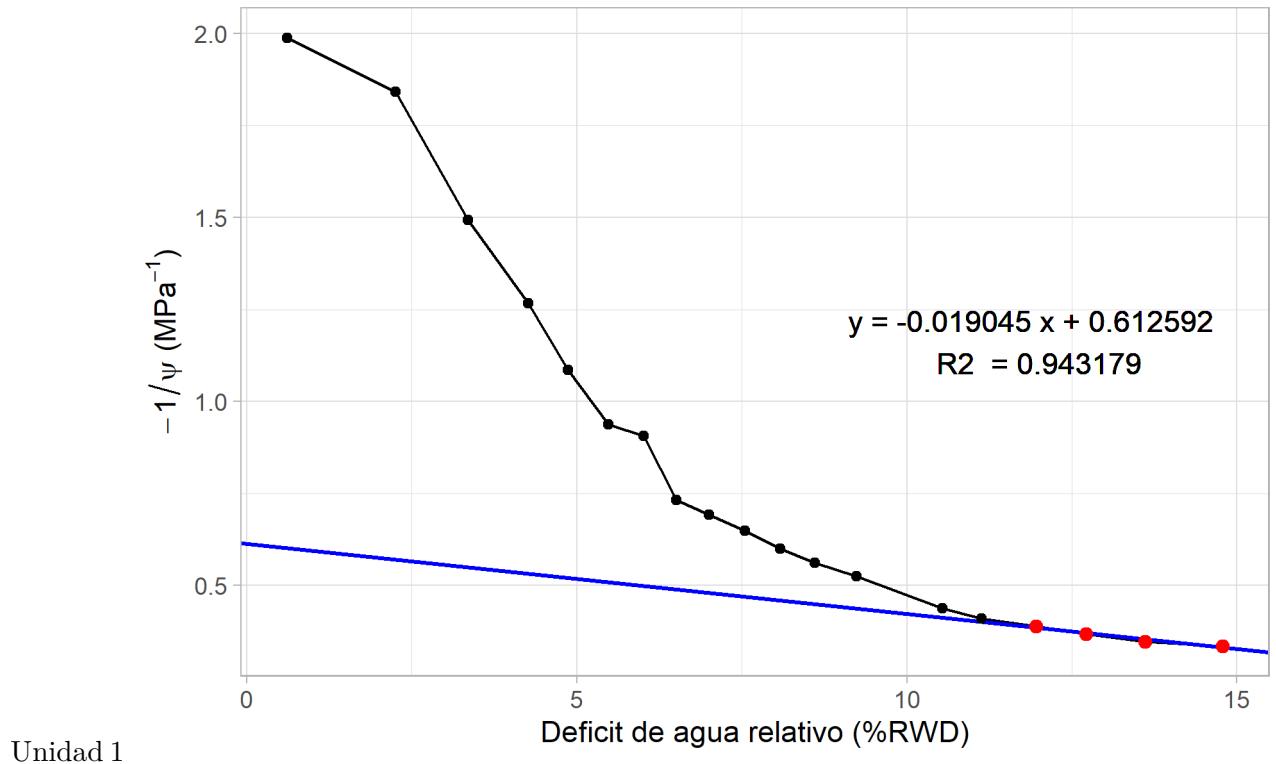


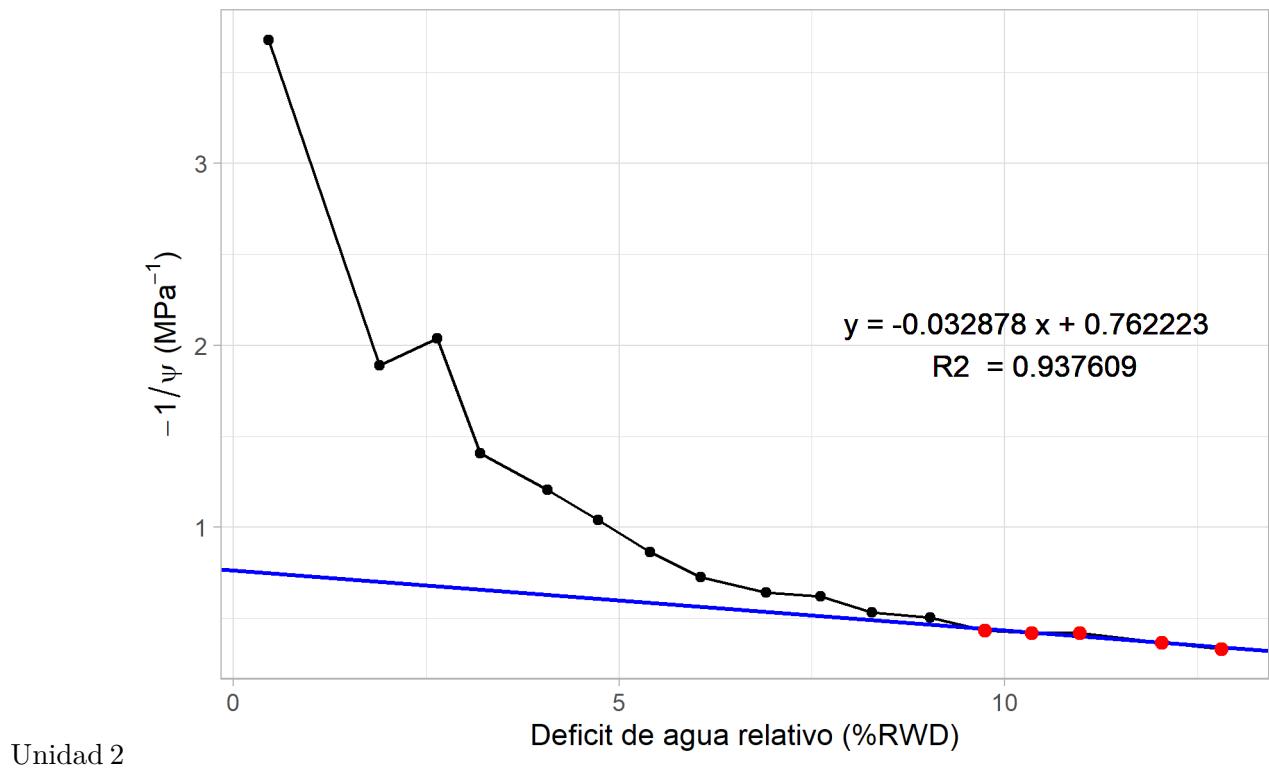


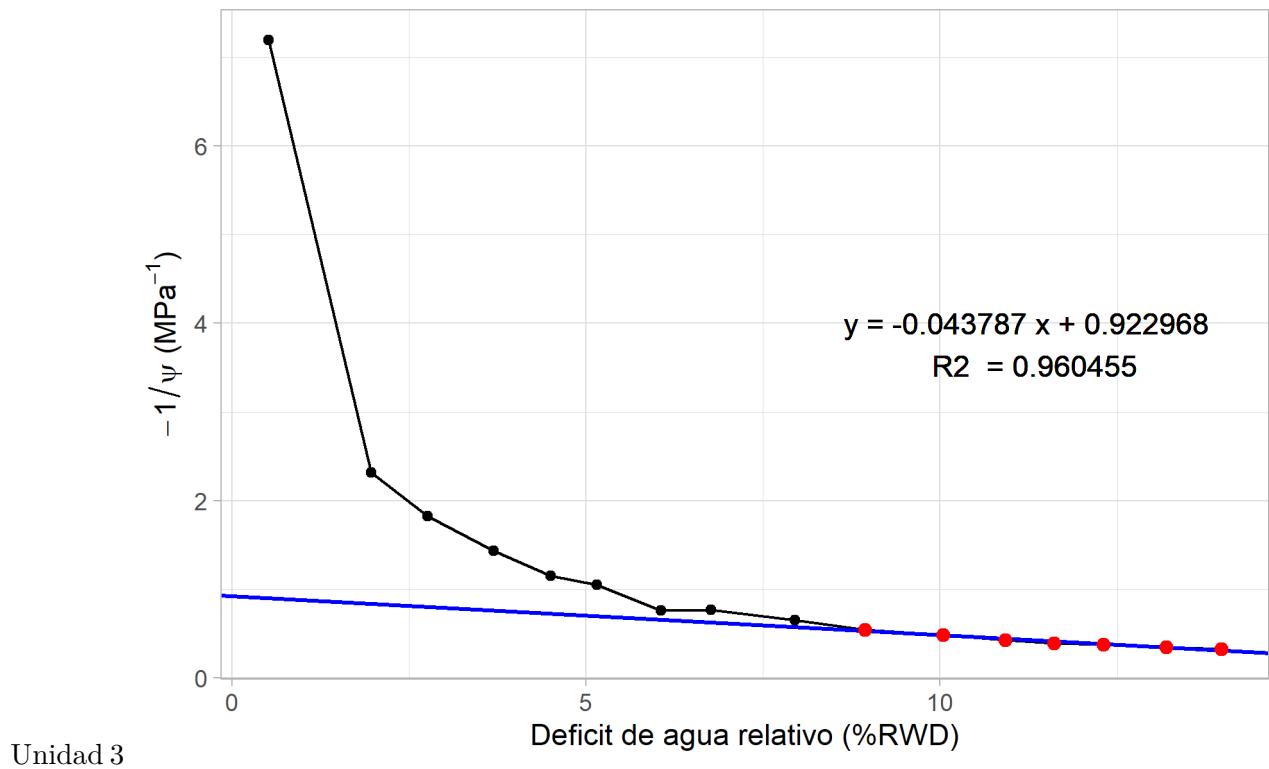


Unidad 3

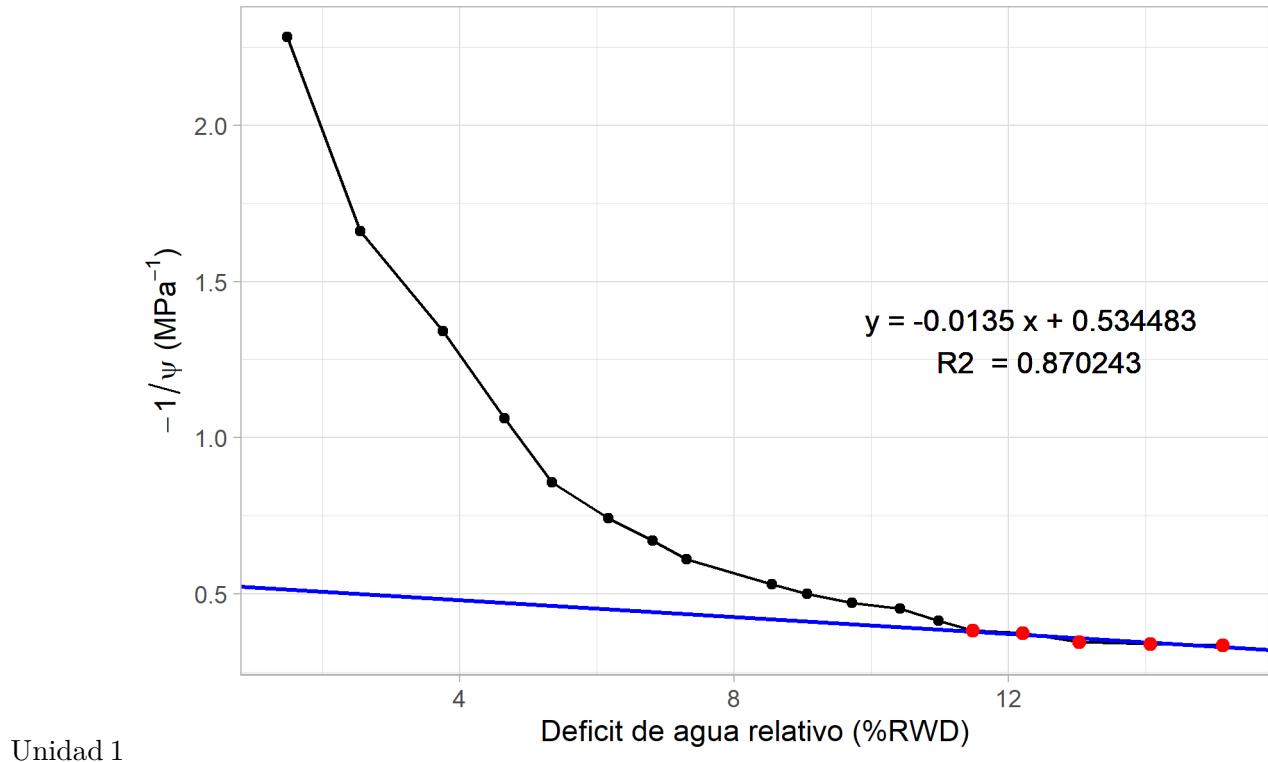
42 Tratamiento 1

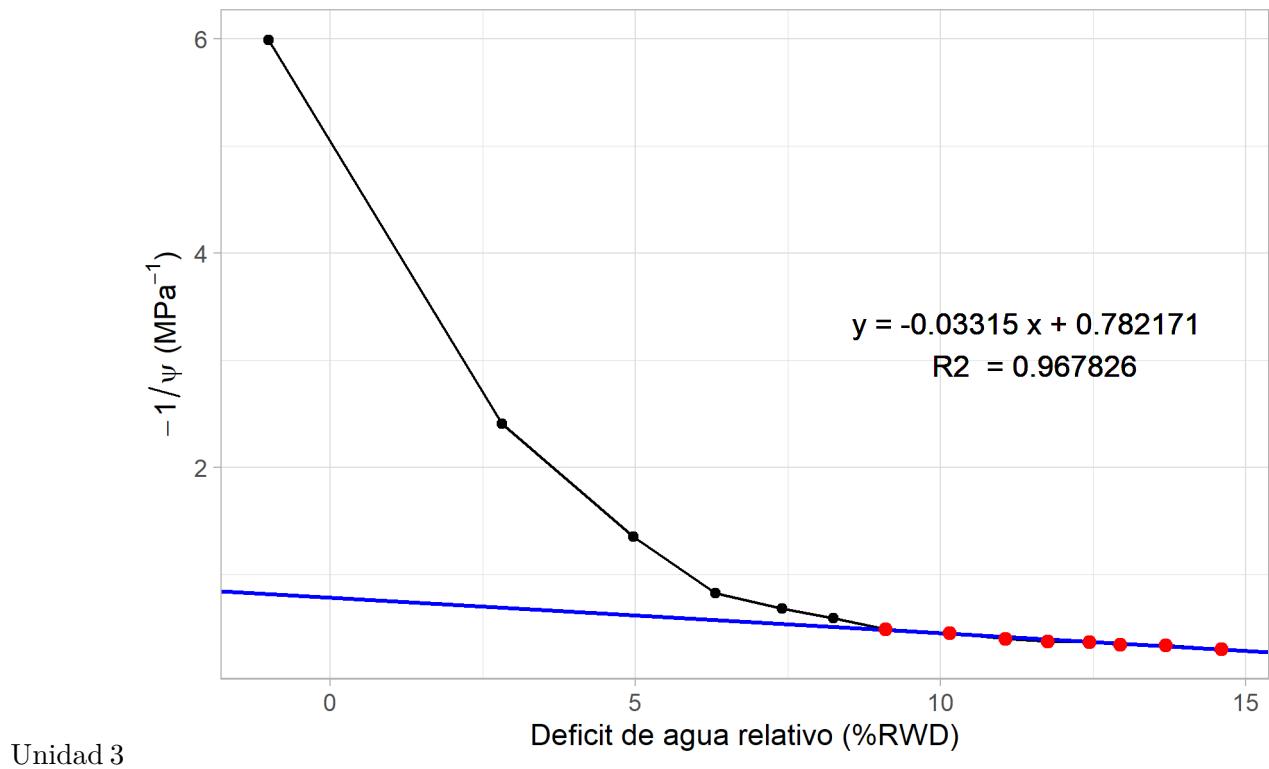




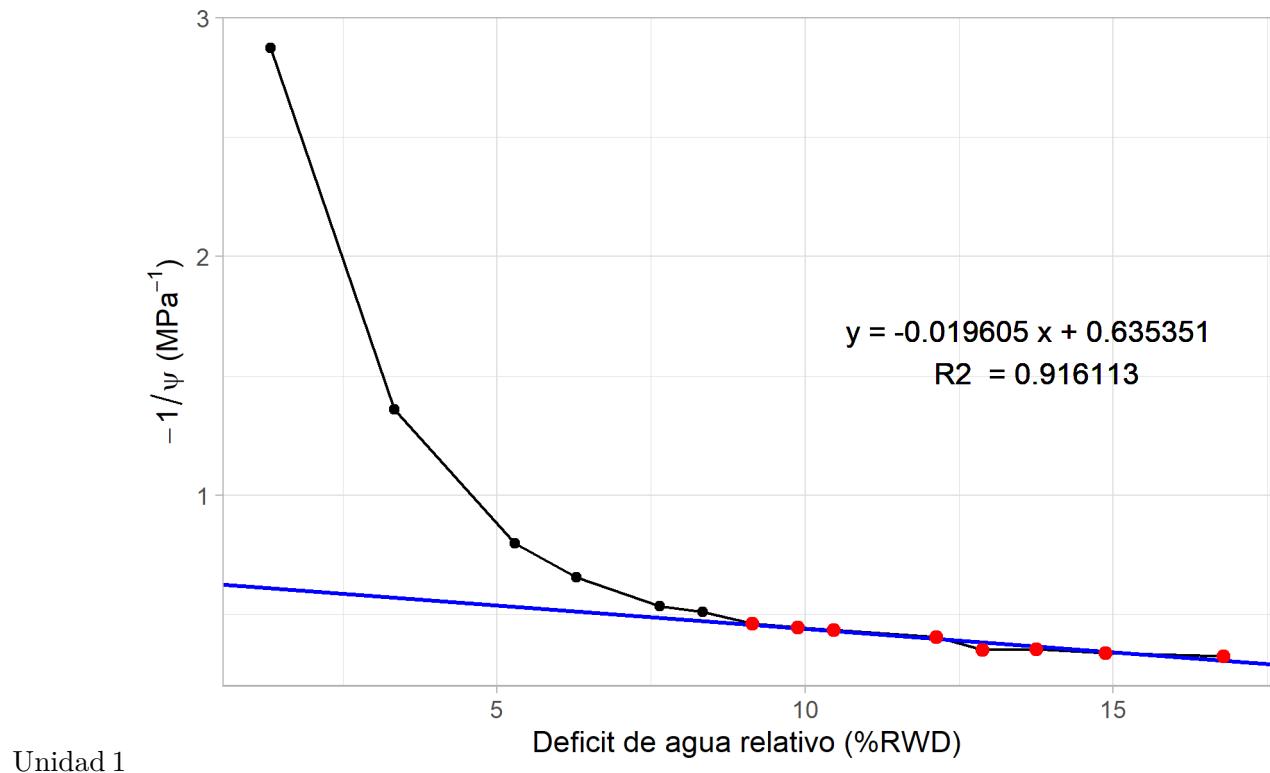


43 Tratamiento 2

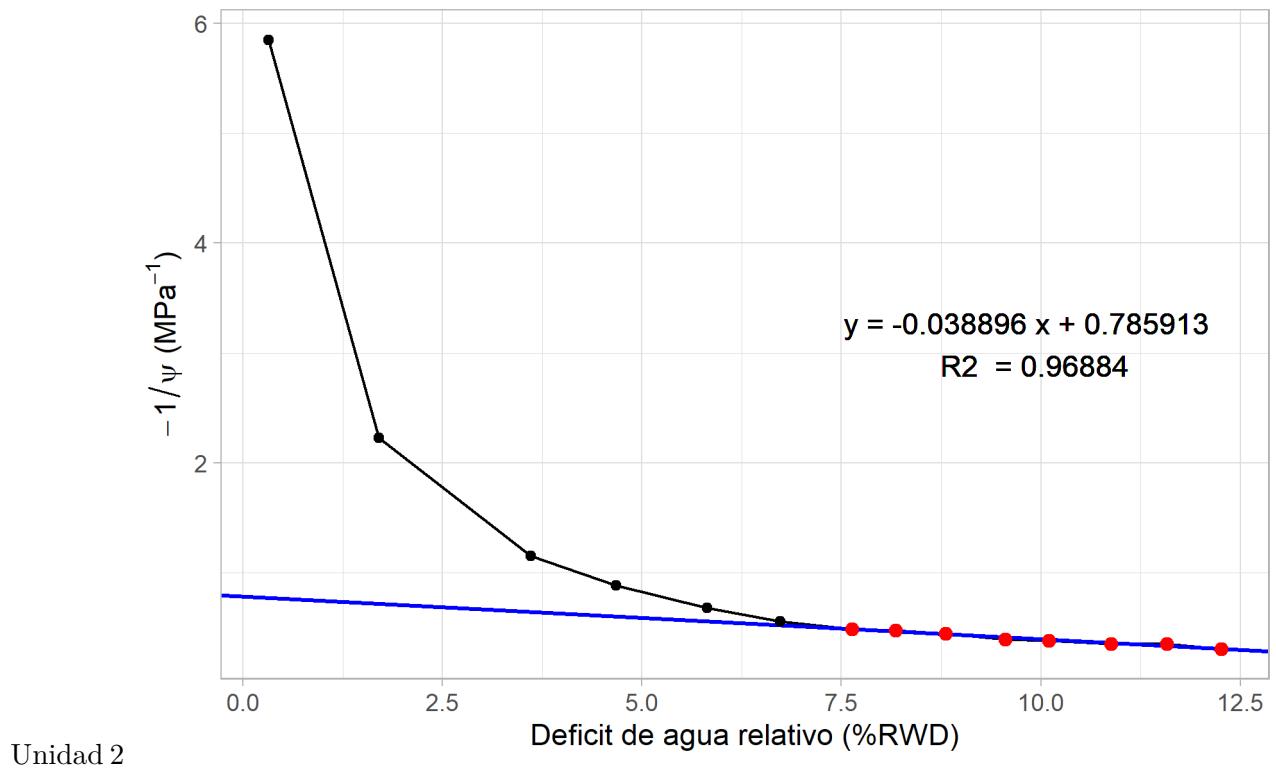


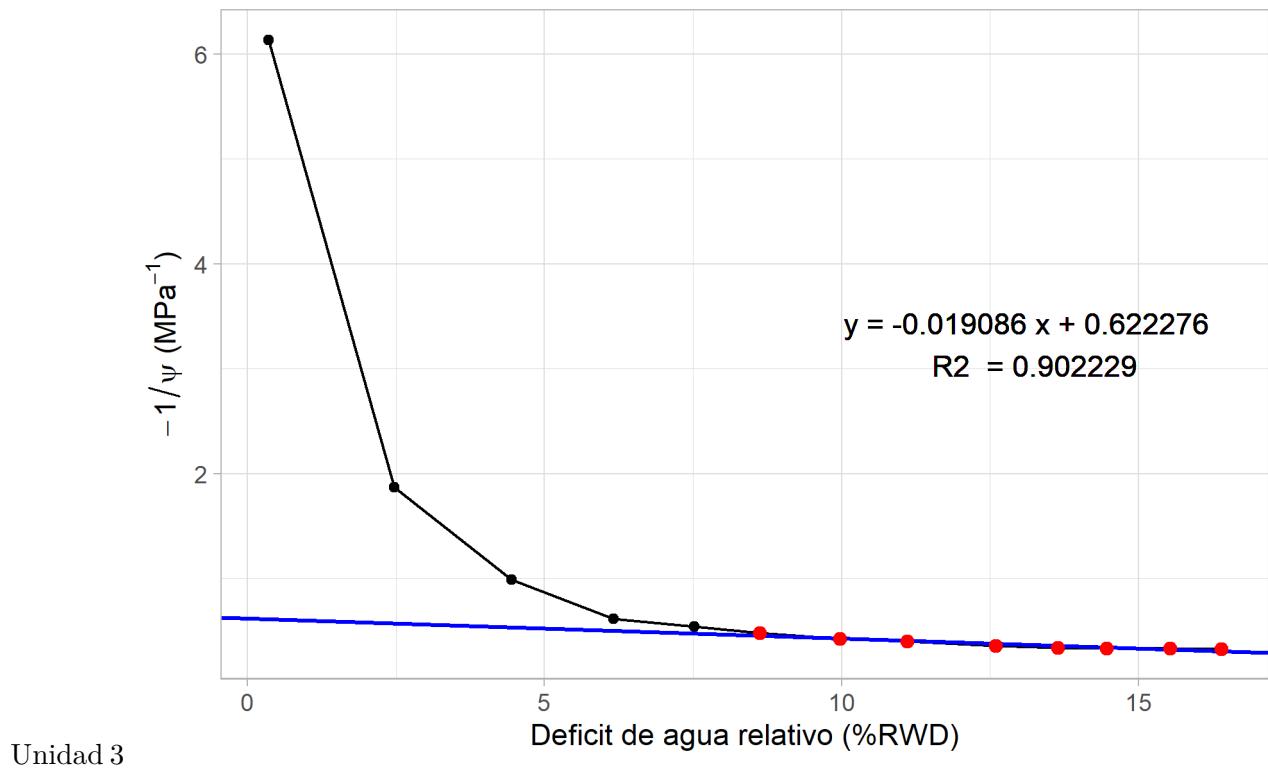


44 Tratamiento 3

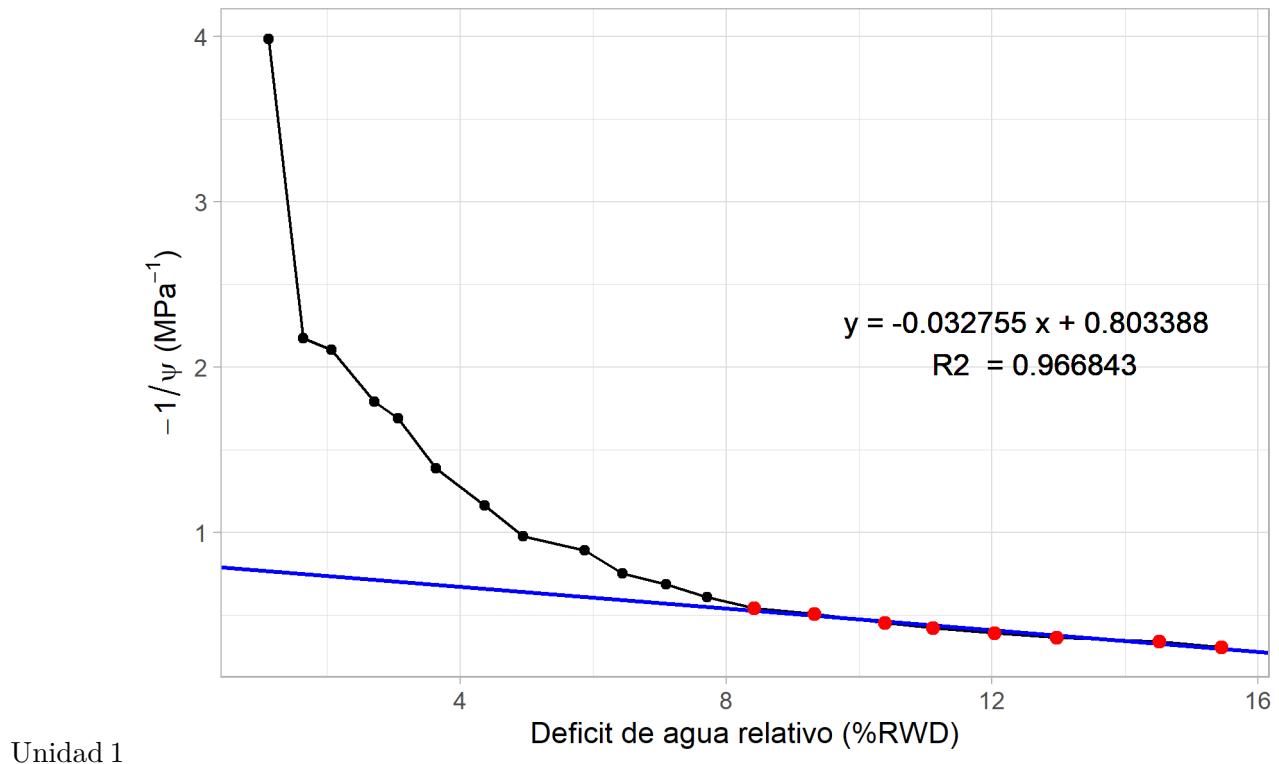


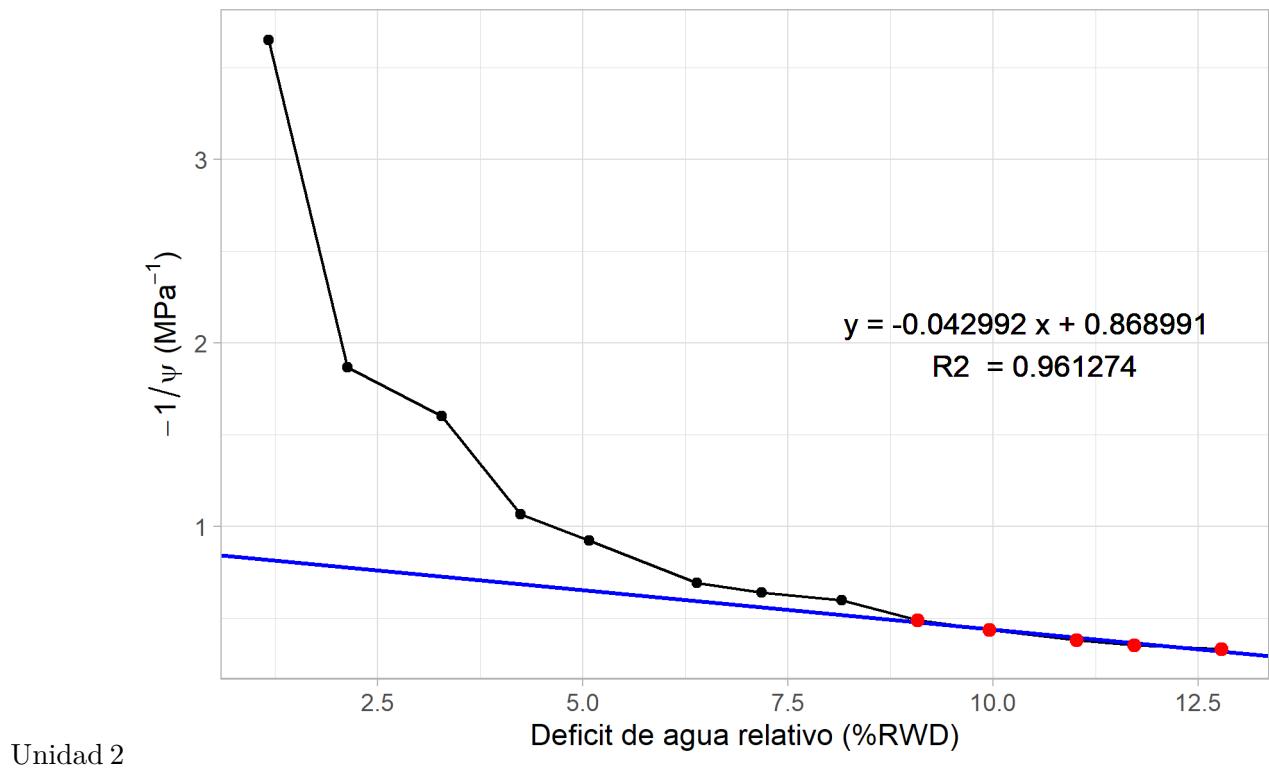
Unidad 1

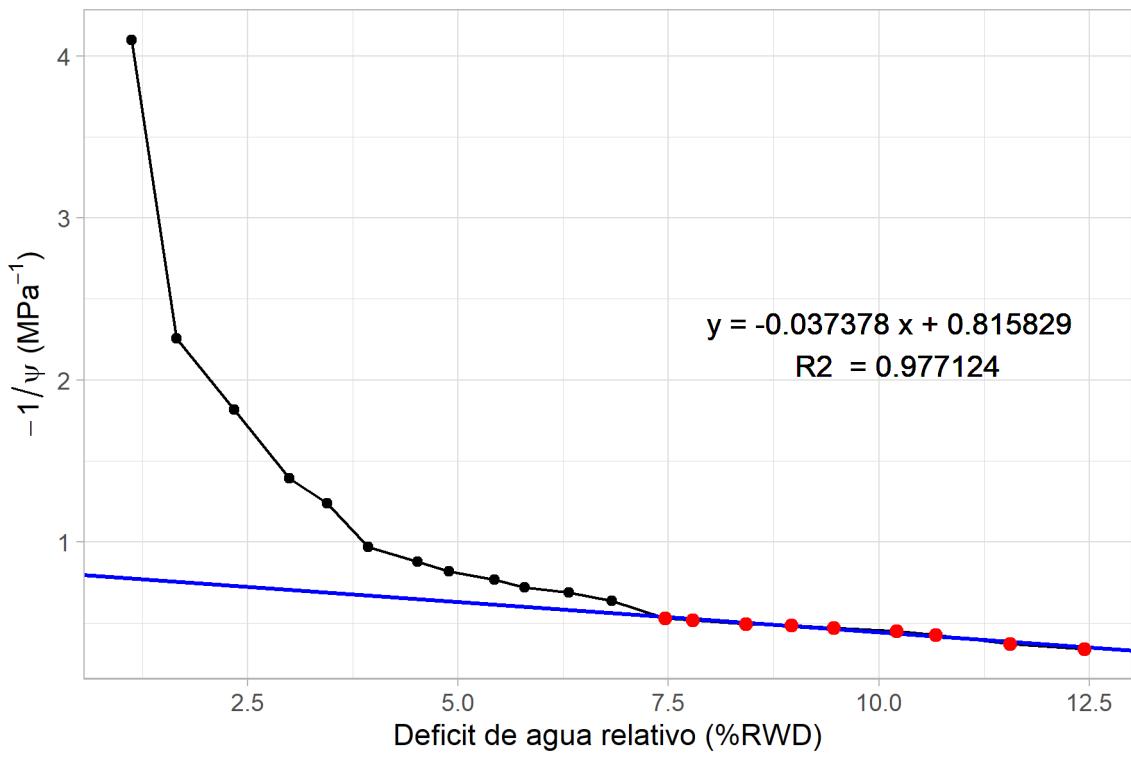




45 Tratamiento 4







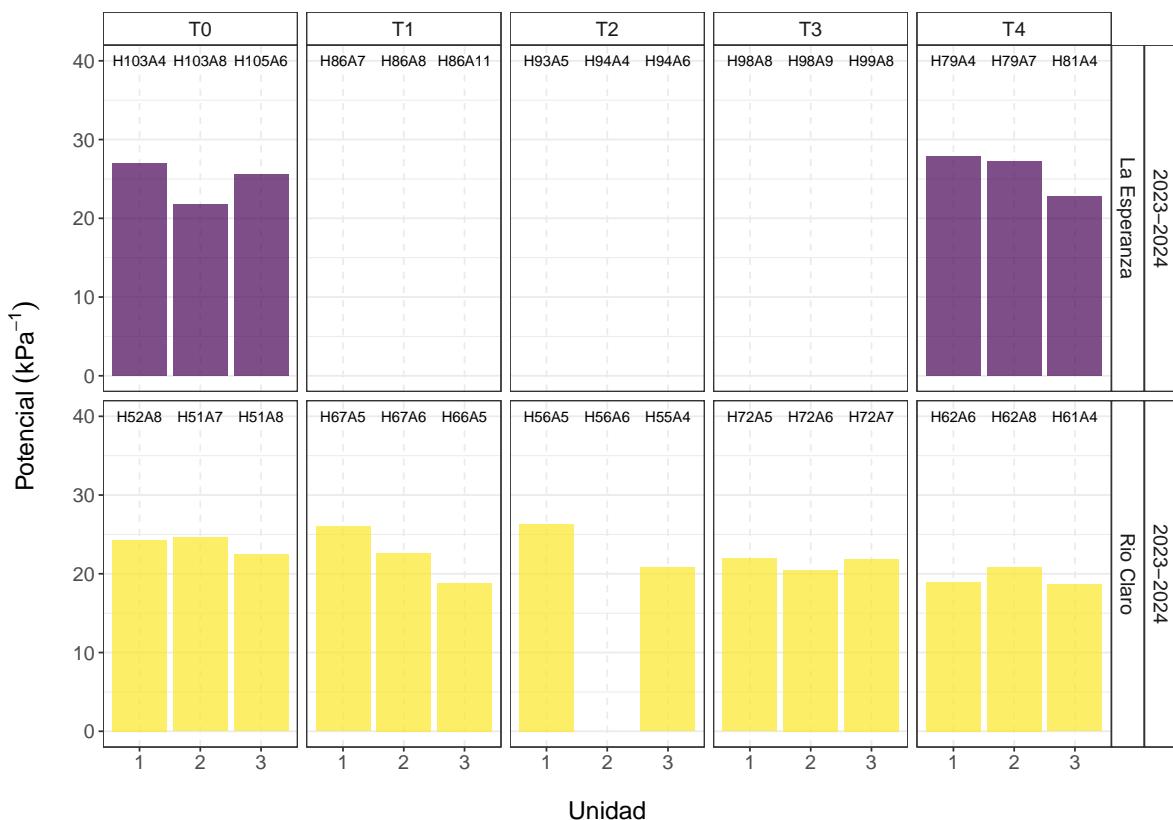
Unidad 3

46 Referencias

Halbritter, A. H., Eycott, A., Reinsch, S., & De Boeck, H. (2020). The handbook for standardised field and laboratory measurements in terrestrial climate-change experiments and observational studies (ClimEx). *Methods in Ecology and Evolution*, 11(1), 22–37.

47 Punto de pérdida de turgor

A continuación se presentan los puntos de pérdida de turgor de cada unidad, según tratamiento, sitio y temporada, a partir de las curvas presión-volumen.



Combinando observaciones en terreno de potencial, y el punto de perdida de turgor obtenido a partir de las curvas presión-volumen ($TLP_{la_esperanza} = -2.54$ MPa; $TLP_{rio_claro} = -2.2$ MPa; ver Figura 2) se puede observar que este punto de estrés hídrico se alcanzó mayoritariamente en los meses de enero y febrero en el campo de Río Claro, durante la temporada 2022-2023. Además, en el mismo contexto se puede observar tendencias a la disminución de potencial para los tratamientos de estrés hídrico más severos (T3 y T4). Por el contrario, en La Esperanza no

se observan disminuciones importantes de potencial, respecto al punto de pérdida de turgor, mientras que tampoco se aprecian diferencias a simple vista entre los tratamientos.

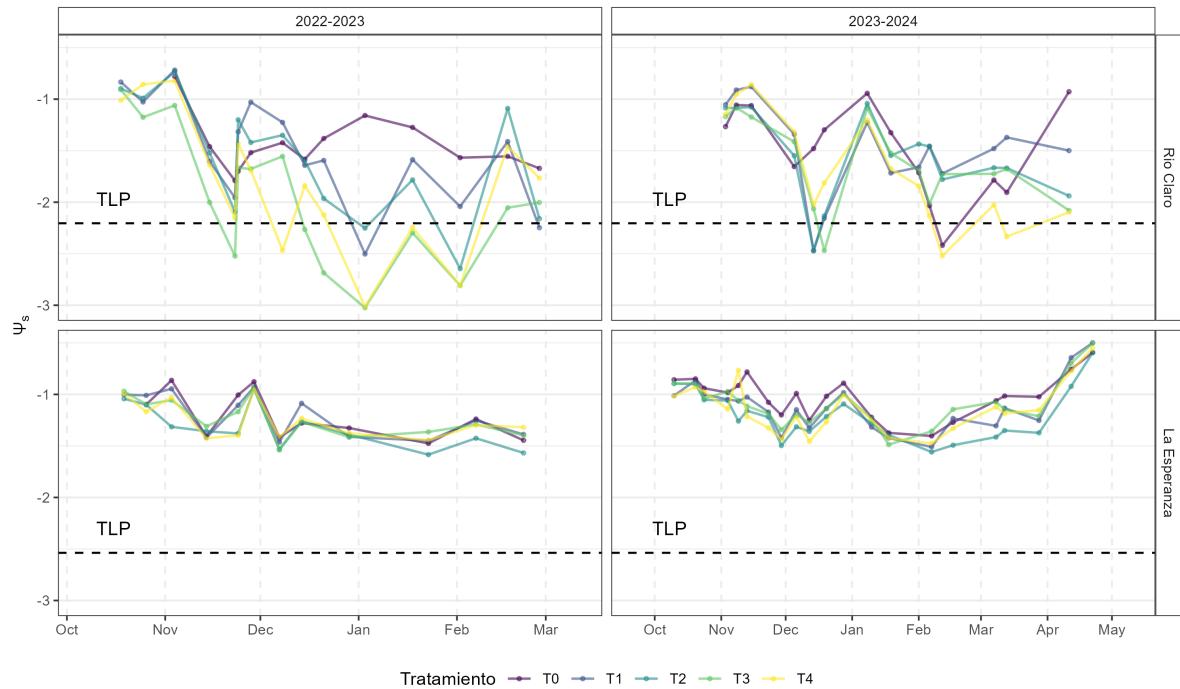


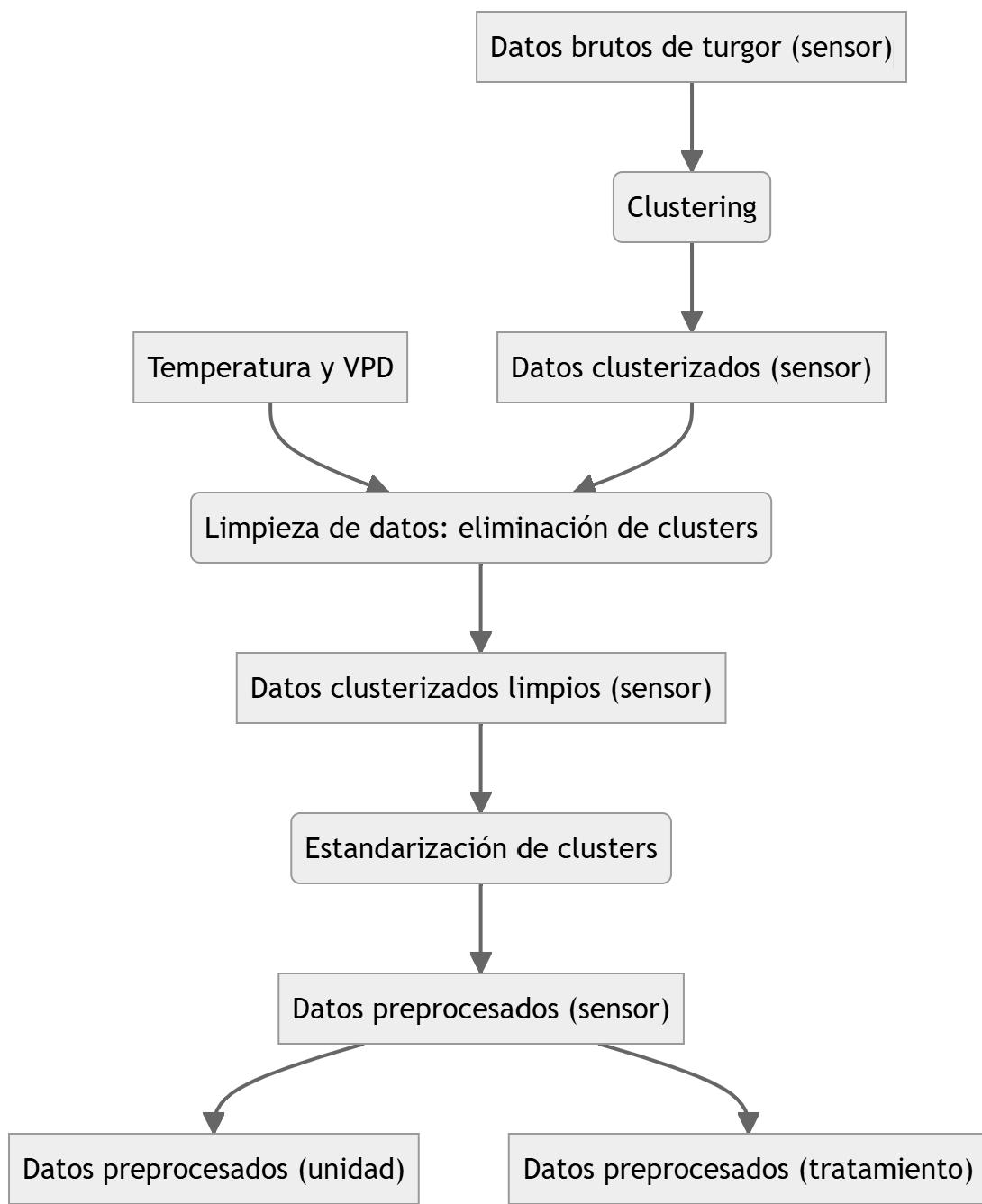
Figura 47.1: Figura 1. Series temporales de potencial hídrico xilemático según temporada (2022-2023; 2023-2024), sitio y tratamientos (T0 a T4). La unidad indica cada árbol por tratamiento (tres por tratamiento), mientras que la línea segmentada indica el punto de pérdida de turgor para cada sitio.

Parte V

Preprocesamiento de datos de turgor

El uso de sensores de turgor (ZIM) en condiciones de campo presentó diversas limitaciones que afectaron la calidad y consistencia de los datos. Los sensores eran altamente sensibles a movimientos causados por viento, caída de hojas o contacto accidental con personas, lo que requería recalibraciones frecuentes y generaba inconsistencias en la magnitud de los valores obtenidos. Además, cada sensor entregaba valores de turgor con magnitudes distintas, impidiendo la comparación directa entre unidades y tratamientos. Estos dispositivos están diseñados para ambientes controlados, como laboratorios, donde no están expuestos a factores externos que puedan desajustar sus mediciones. Sin embargo, en terreno, la suciedad, el clima y otros elementos dificultaron su estabilidad y precisión.

Para mitigar estas limitaciones, se implementó un proceso de preprocesamiento basado en tres etapas principales: filtrado, clustering y modelado. Primero, se eliminaron registros inconsistentes mediante tres criterios: (i) estabilidad en la serie de turgor (diferencias estandarizadas < 1), (ii) correlaciones esperadas con temperatura y VPD (positiva y negativa, respectivamente) y (iii) una correlación mínima de 0.5 con al menos una de estas variables. Posteriormente, se excluyeron valores fuera del rango temporal relevante. Luego, se agruparon los datos por sitio, temporada y sensor, calculando estadísticos diarios (mediana, máximo y mínimo) y aplicando clustering con DBSCAN para identificar patrones coherentes. Finalmente, se ajustaron modelos lineales entre turgor y los primeros componentes principales (PC1 y PC2), obteniendo coeficientes de regresión para cada grupo. Con estos parámetros, se generó una serie modelada de turgor a partir de la información PCA y se escaló para comparación.



A pesar de estos esfuerzos, finalmente no fue posible utilizar los valores obtenidos. La necesidad de estandarización y modelado para corregir las inconsistencias terminó eliminando la magnitud de los valores y las diferencias entre unidades, lo que impidió un análisis adecuado

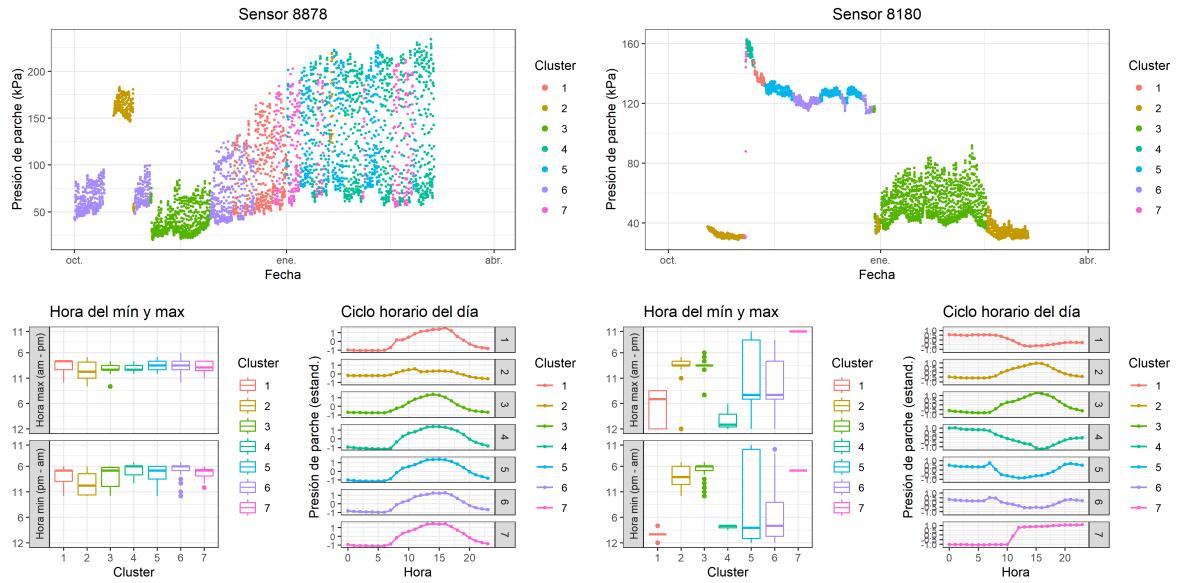
de las variaciones de turgor entre tratamientos y temporadas.

48 Clustering

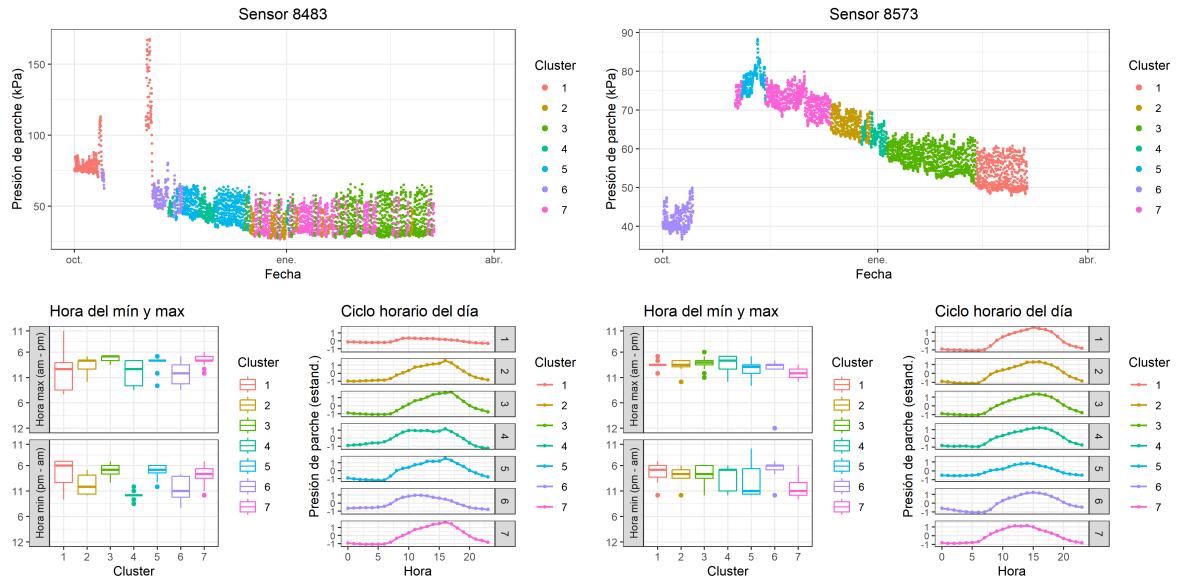
A continuación, se muestran las series temporales de turgor diferenciadas por clúster, así como la distribución de las horas de turgor mínimo y máximo para cada uno de ellos, junto con su ciclo horario diario, abarcando todos los sensores en todas las unidades durante las temporadas 2022-2023 y 2023-2024.

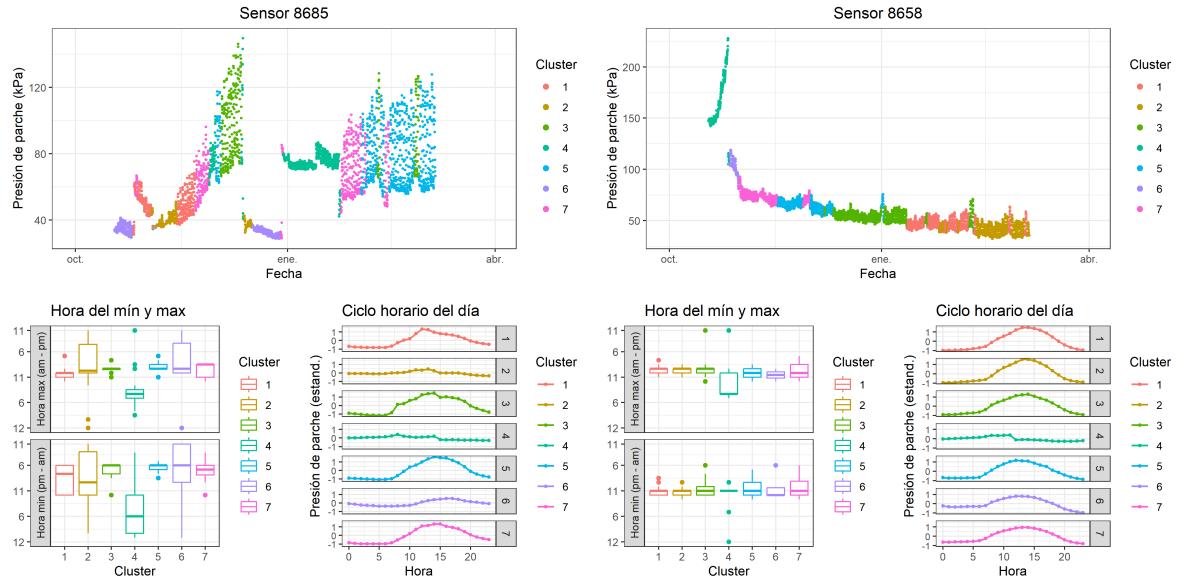
48.1 La Esperanza

49 T1 (2022-2023)



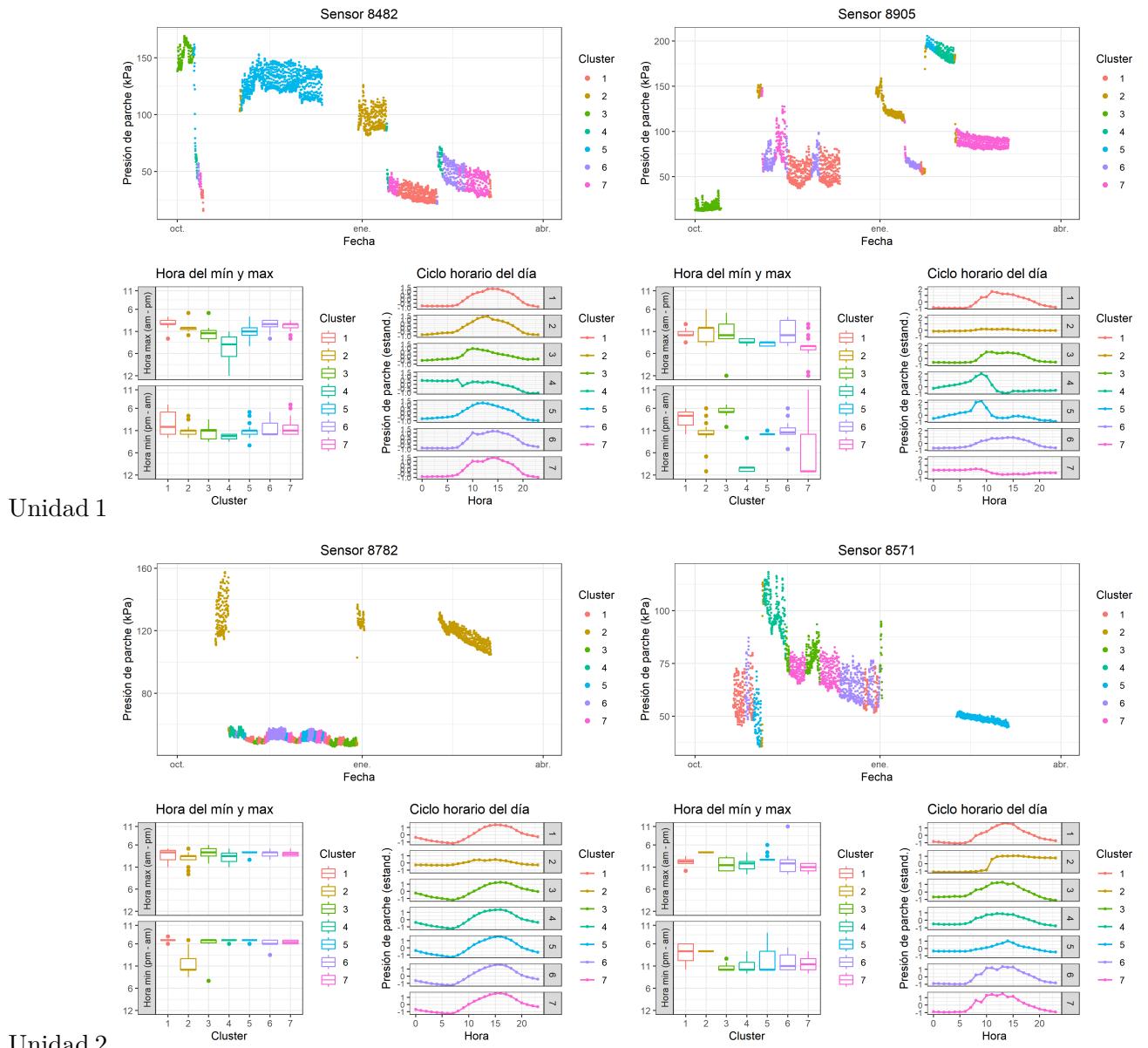
Unidad 1

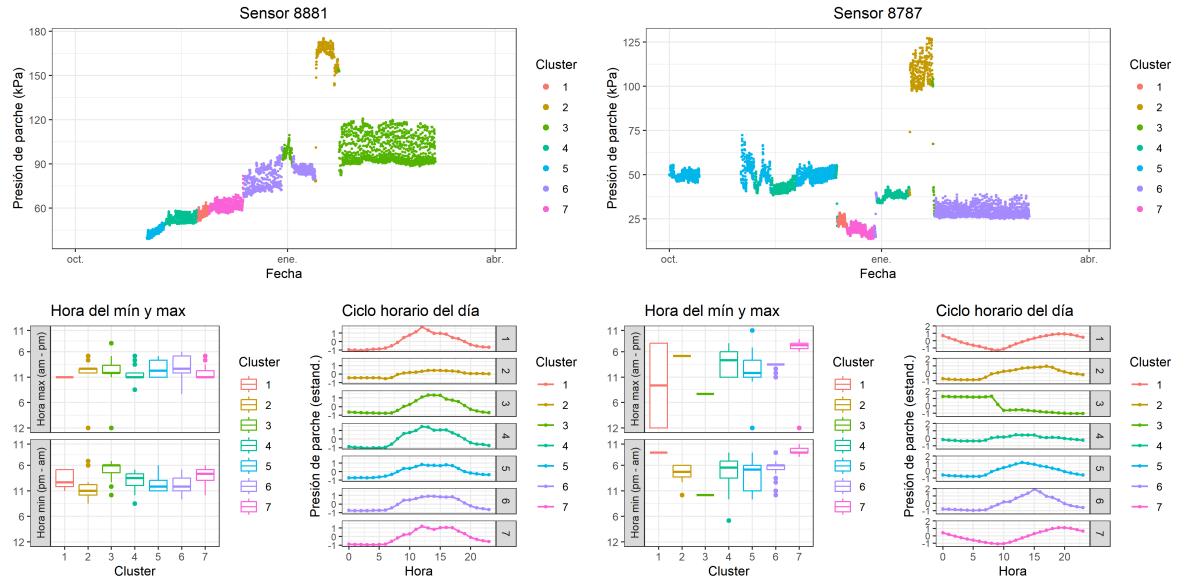




Unidad 3

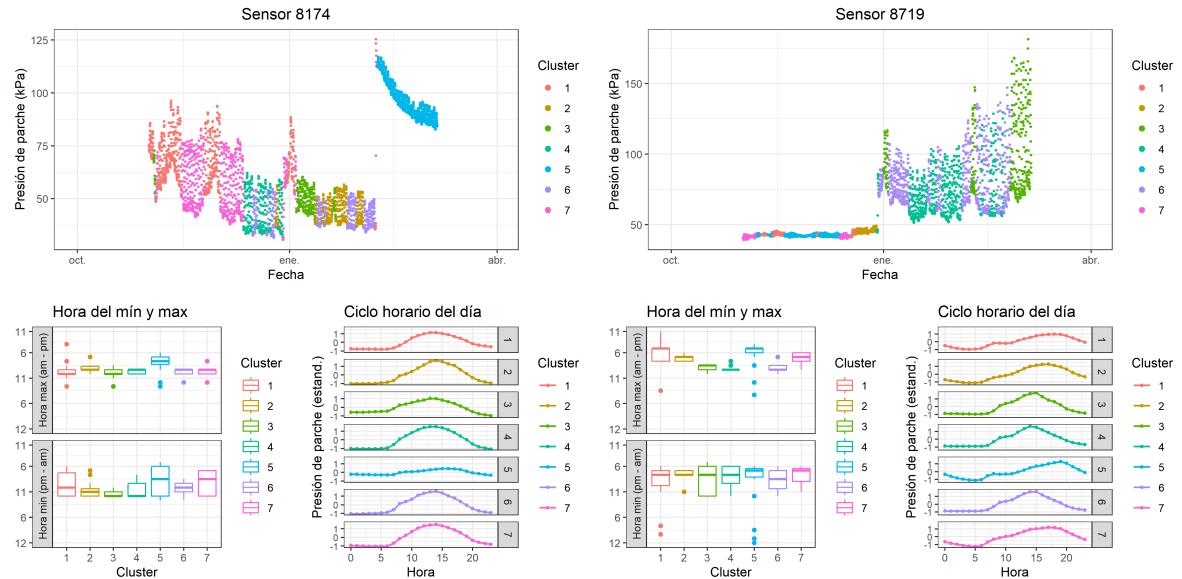
50 T2 (2022-2023)



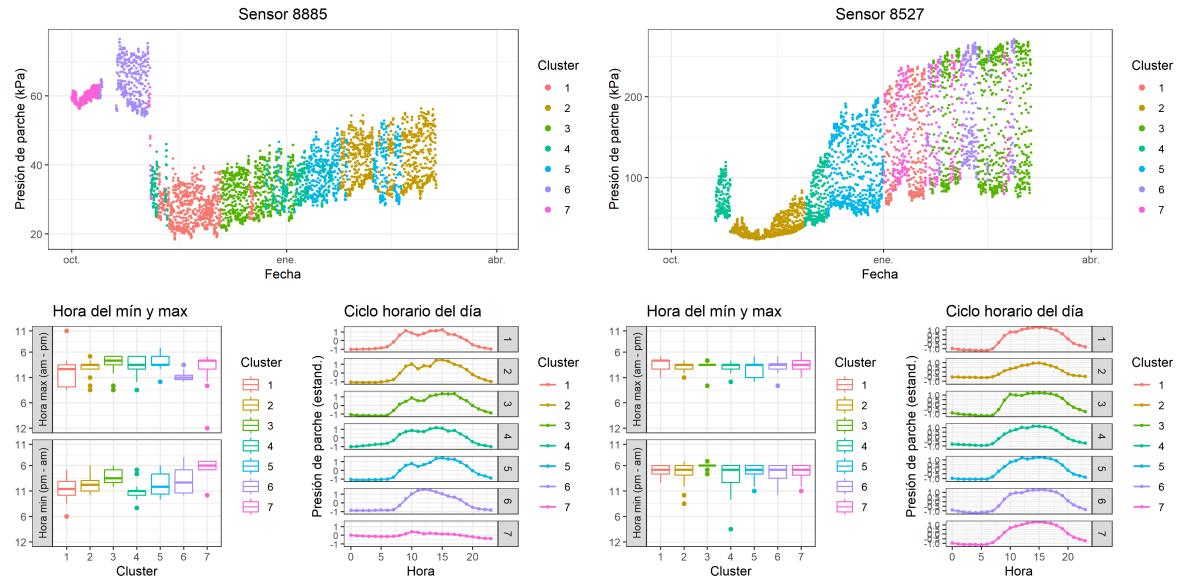


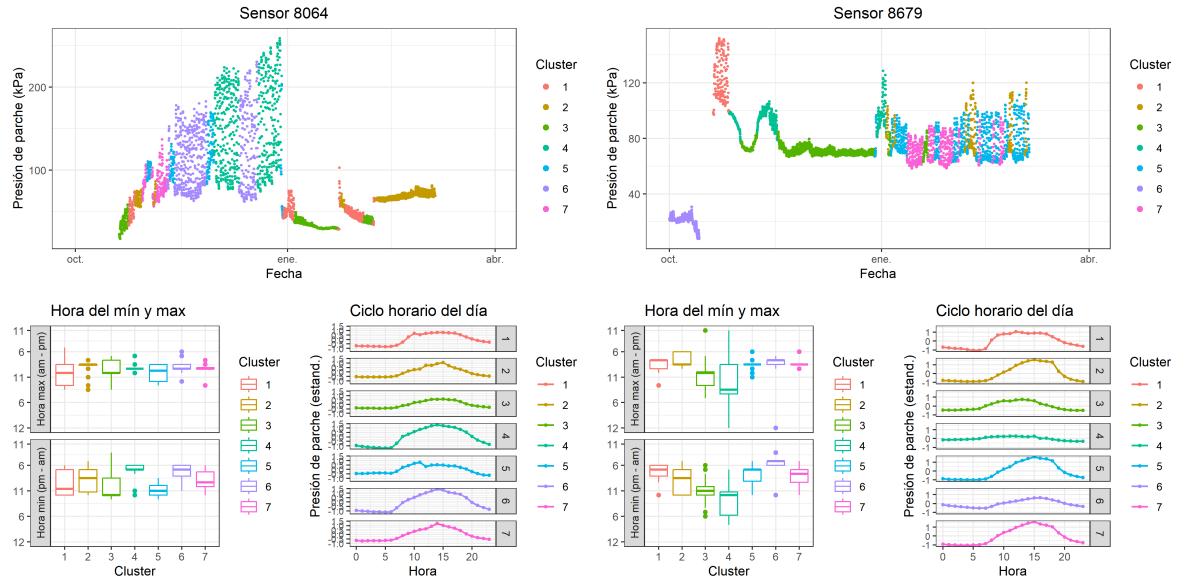
Unidad 3

51 T3 (2022-2023)



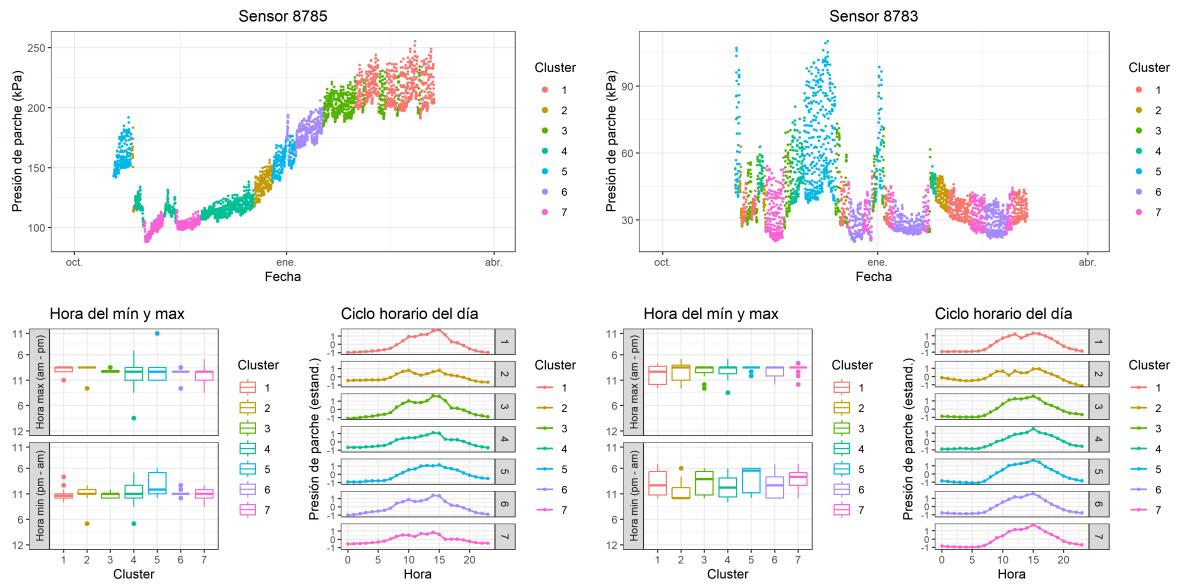
Unidad 1



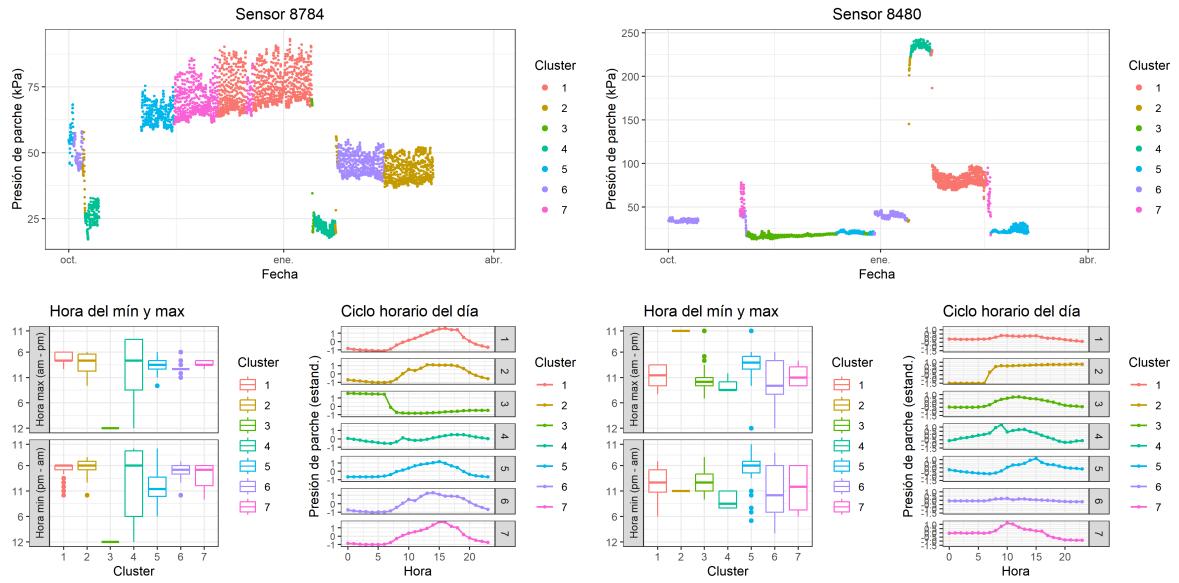


Unidad 3

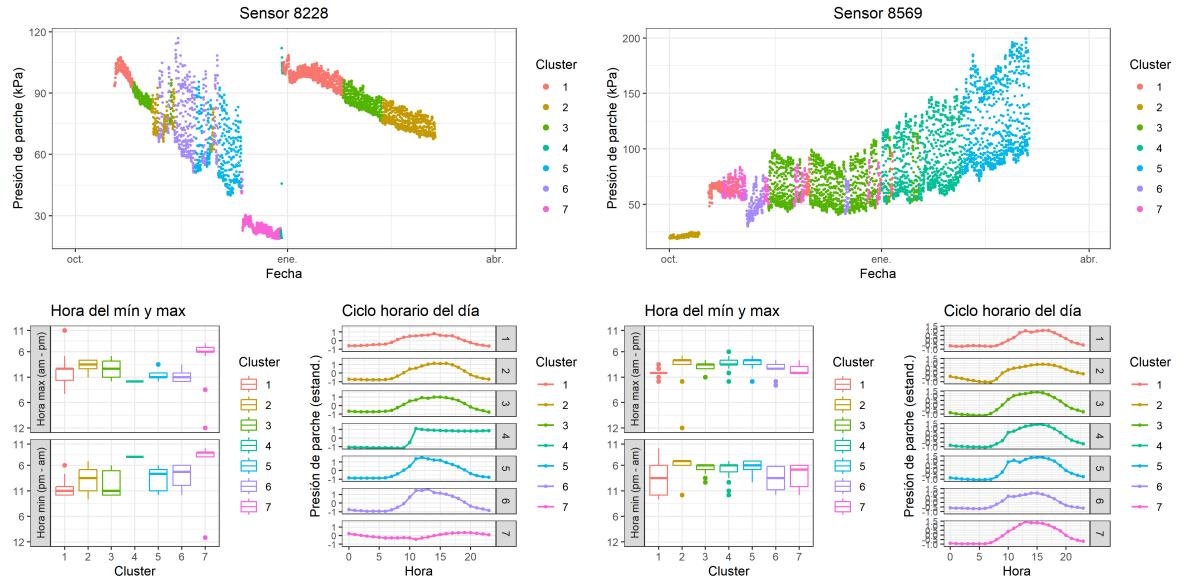
52 T4 (2022-2023)



Unidad 1

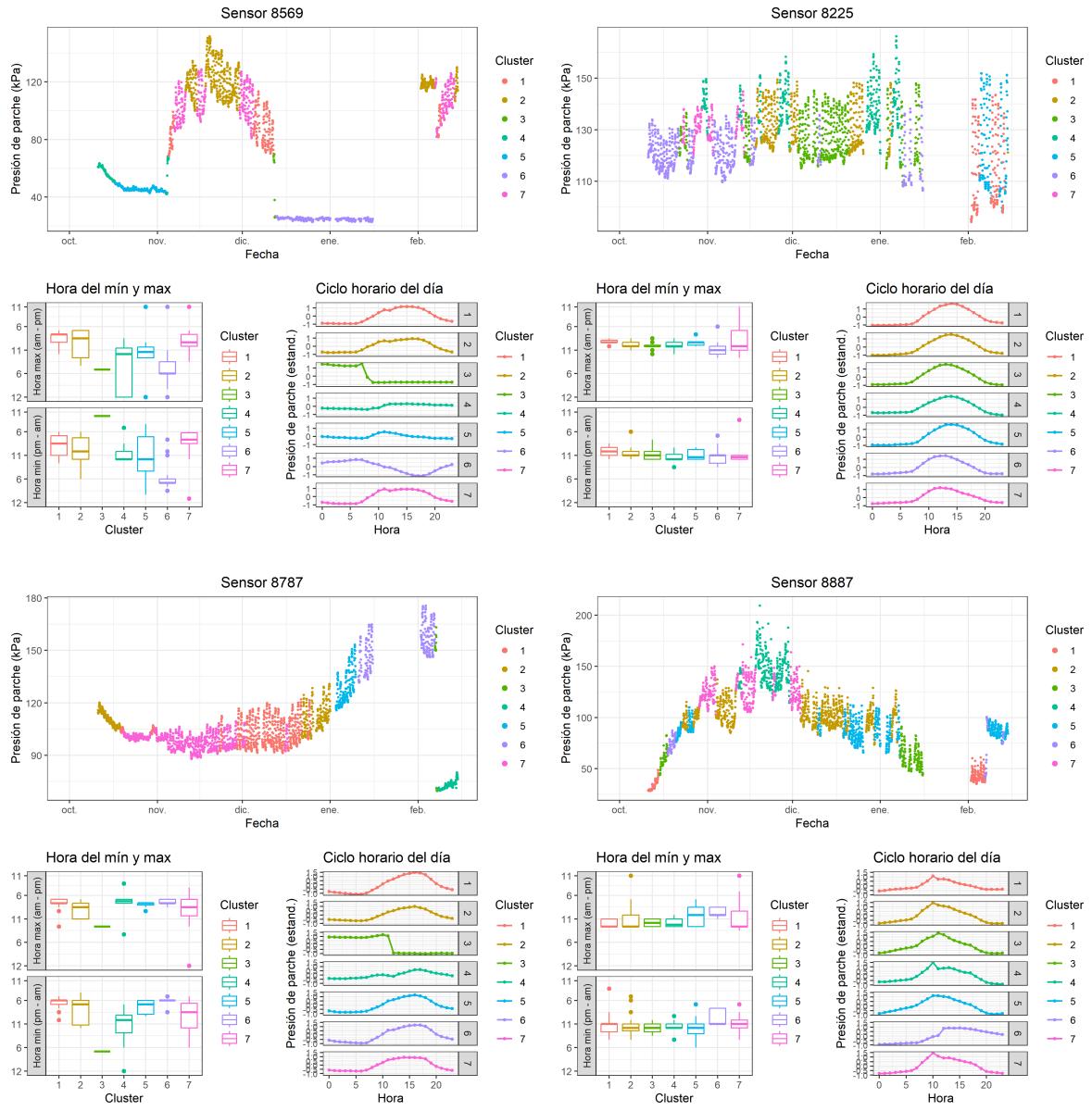


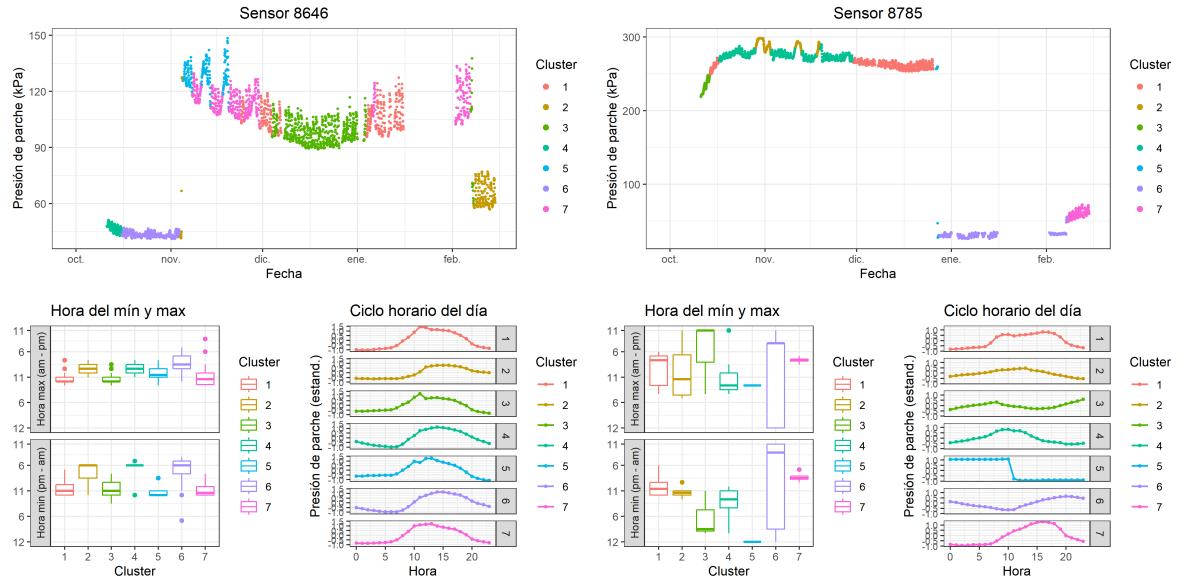
Unidad 2



Unidad 3

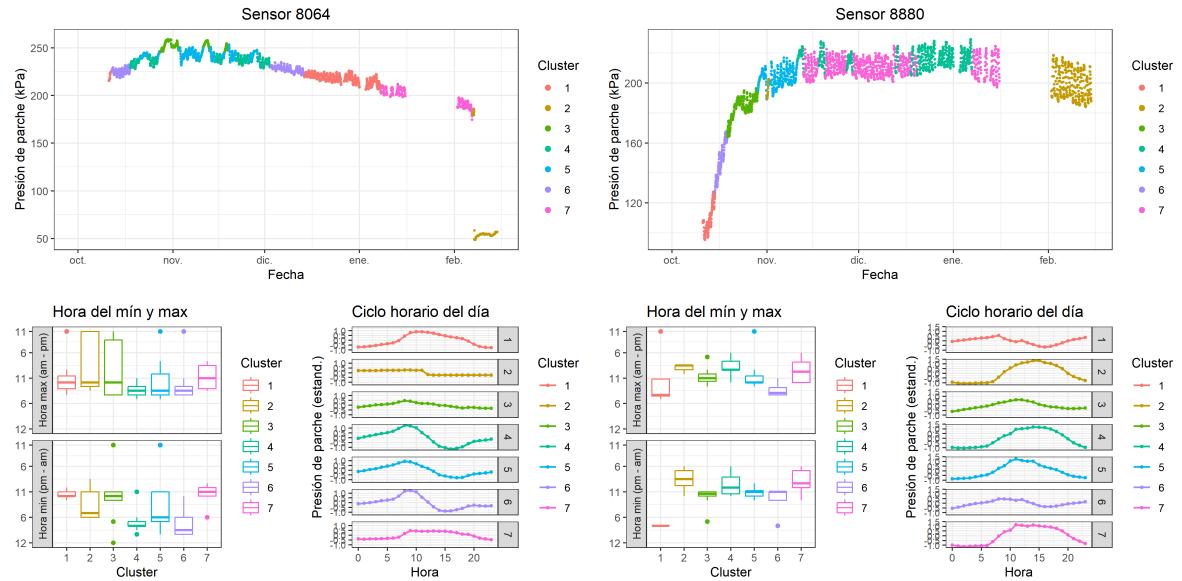
53 T1 (2023-2024)



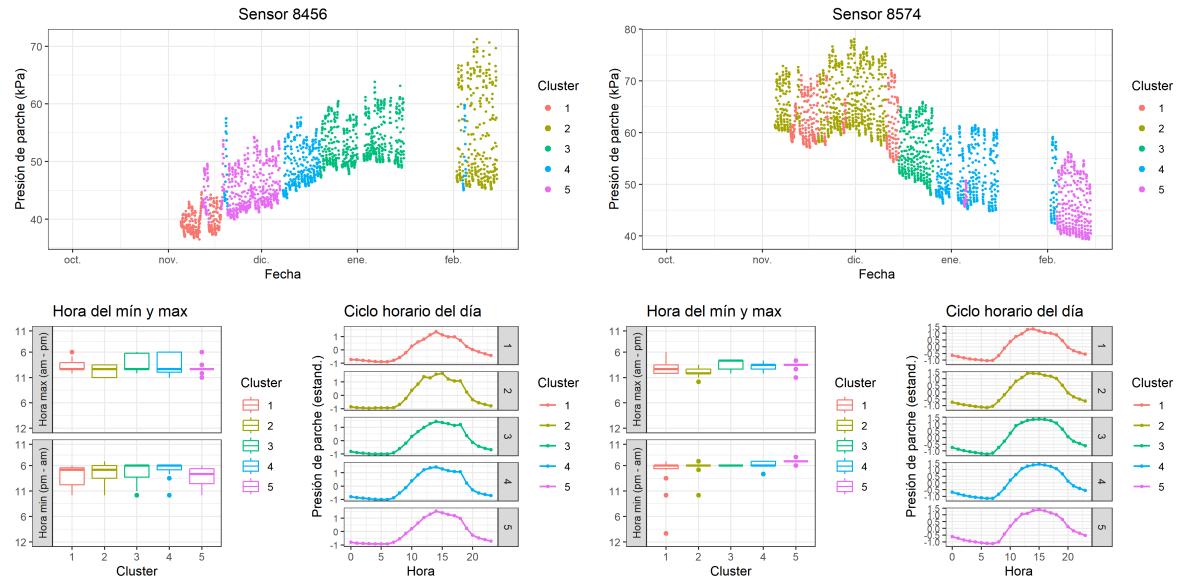


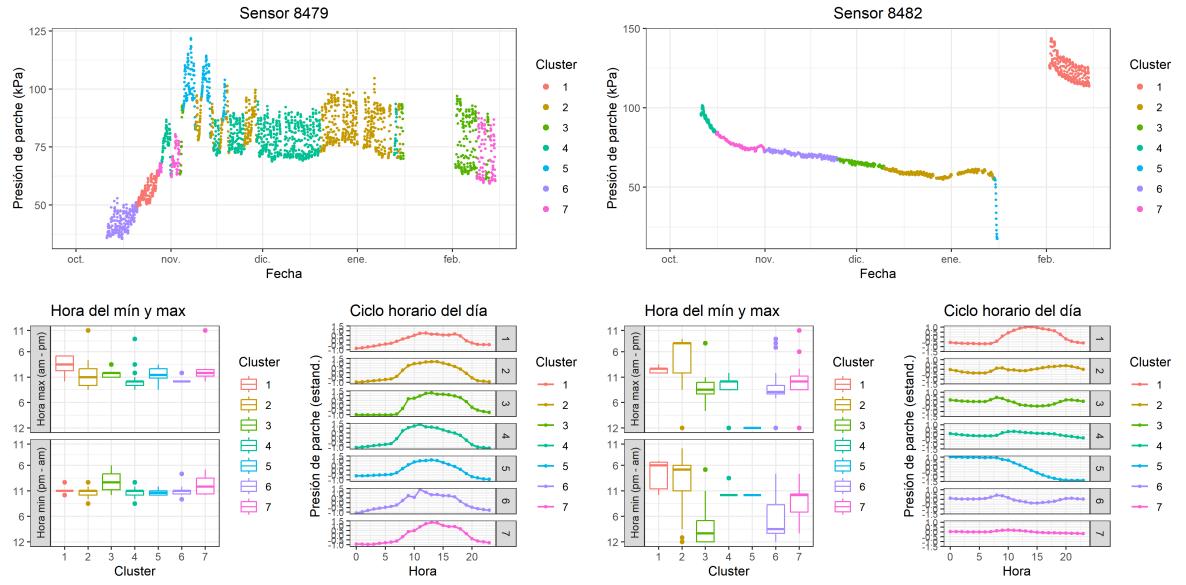
Unidad 3

54 T2 (2023-2024)



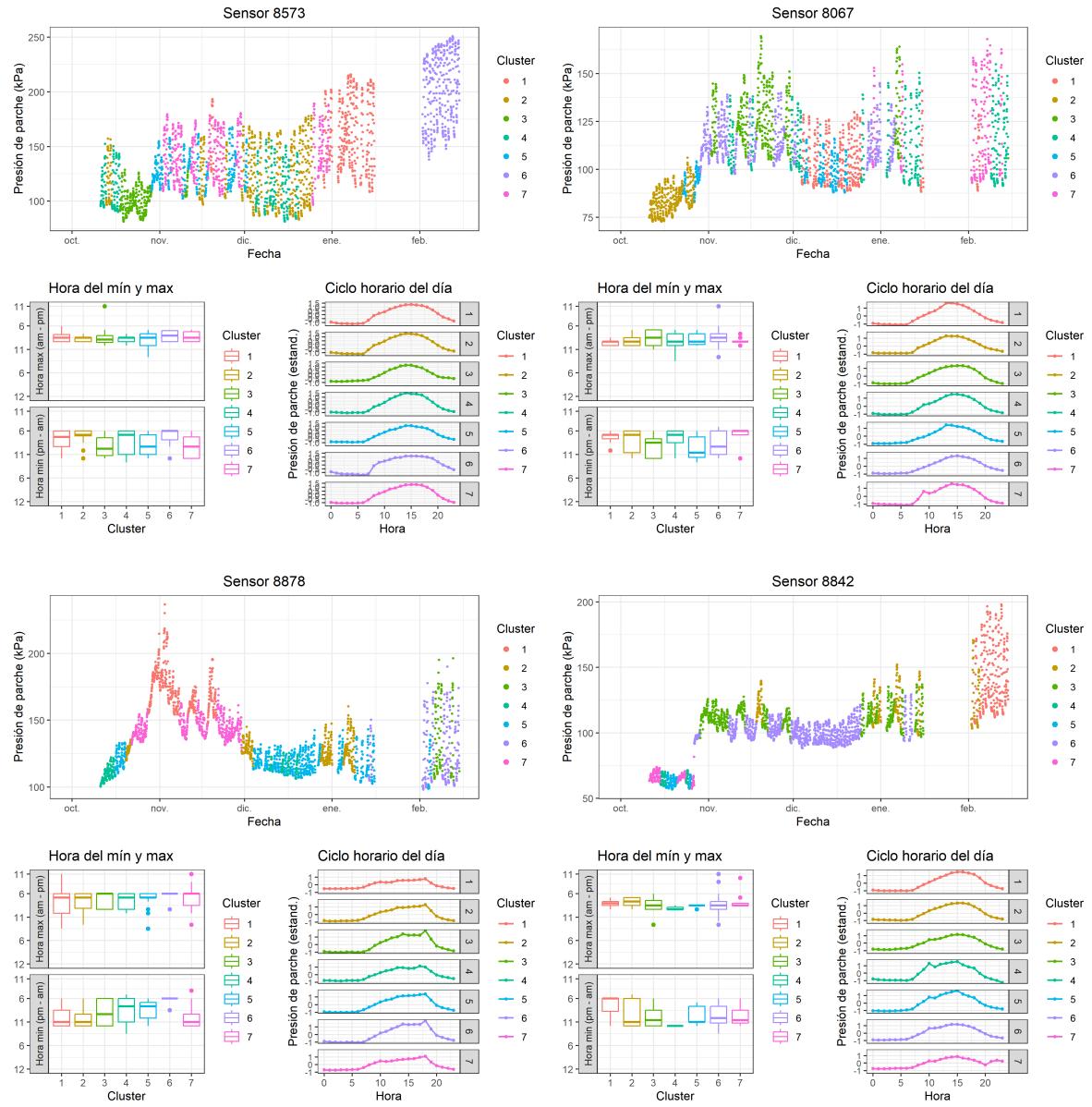
Unidad 1

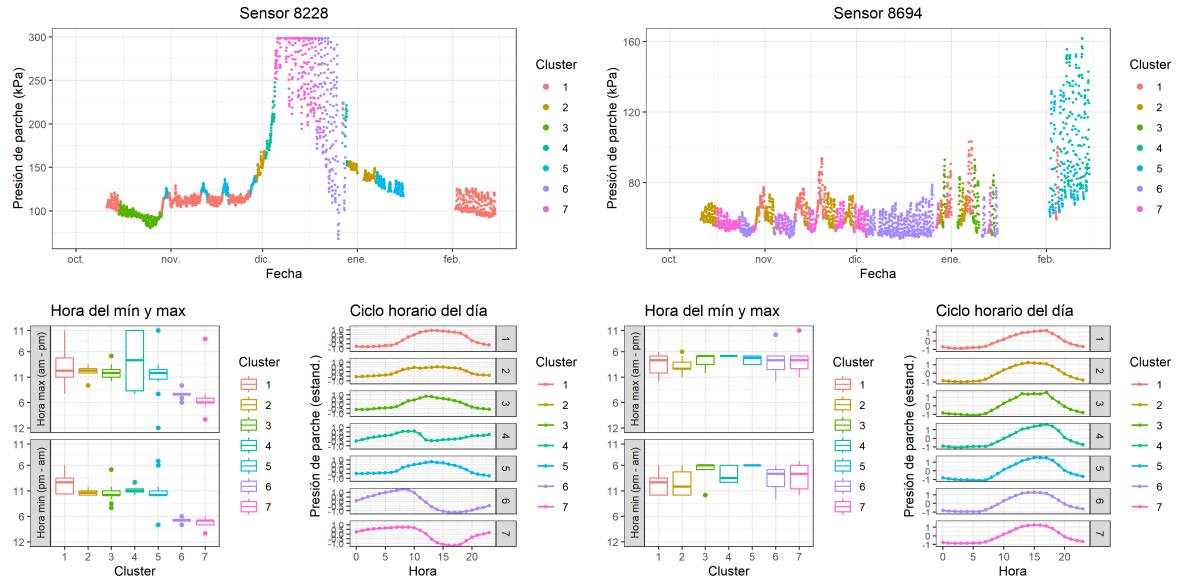




Unidad 3

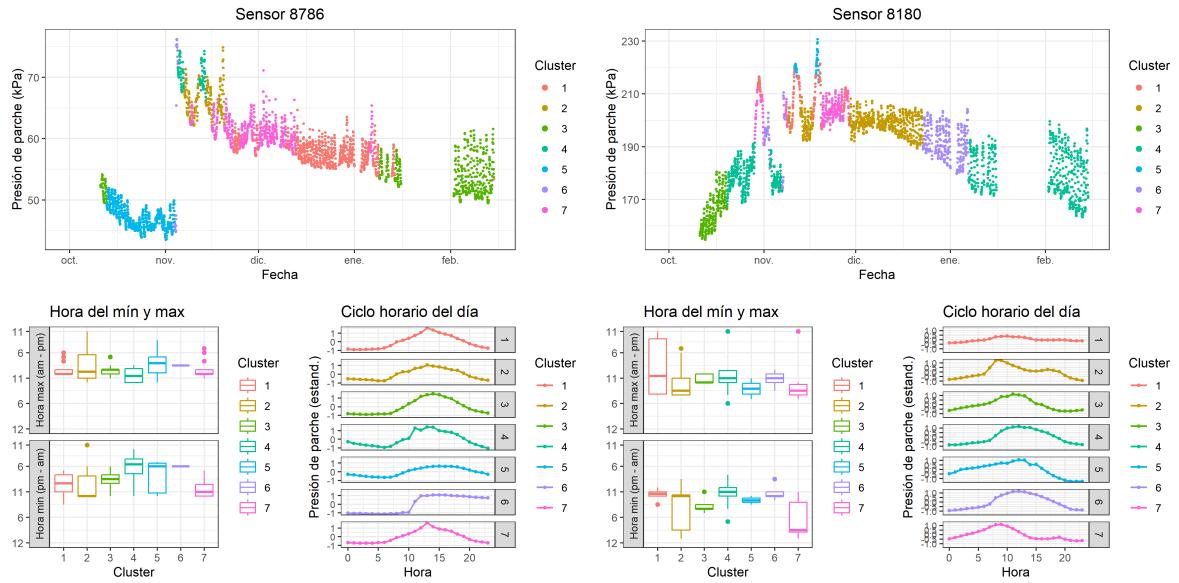
55 T3 (2023-2024)



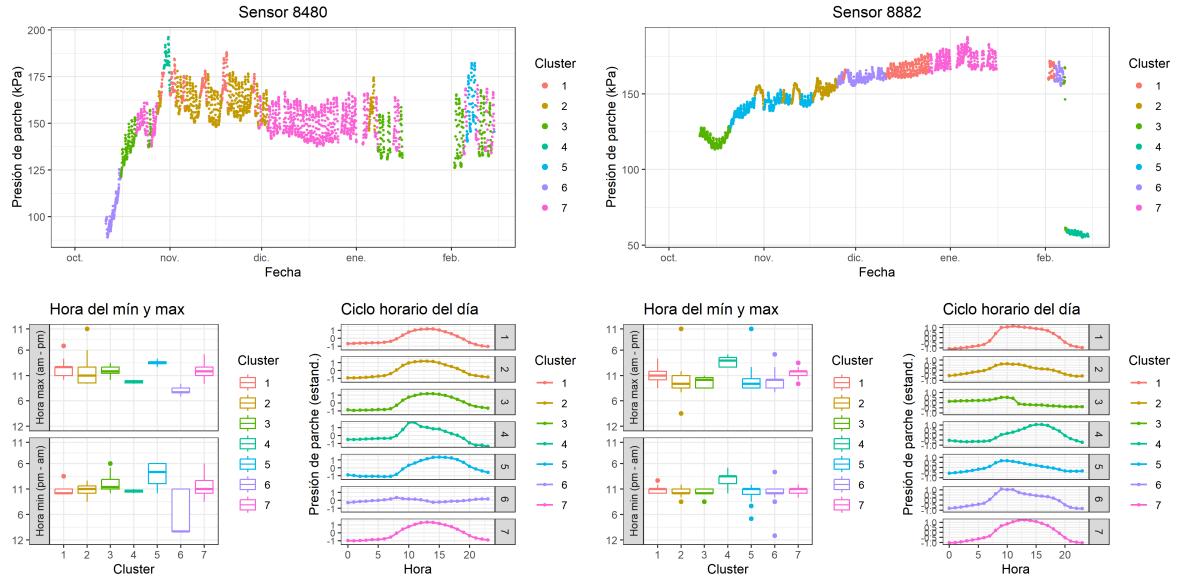


Unidad 3

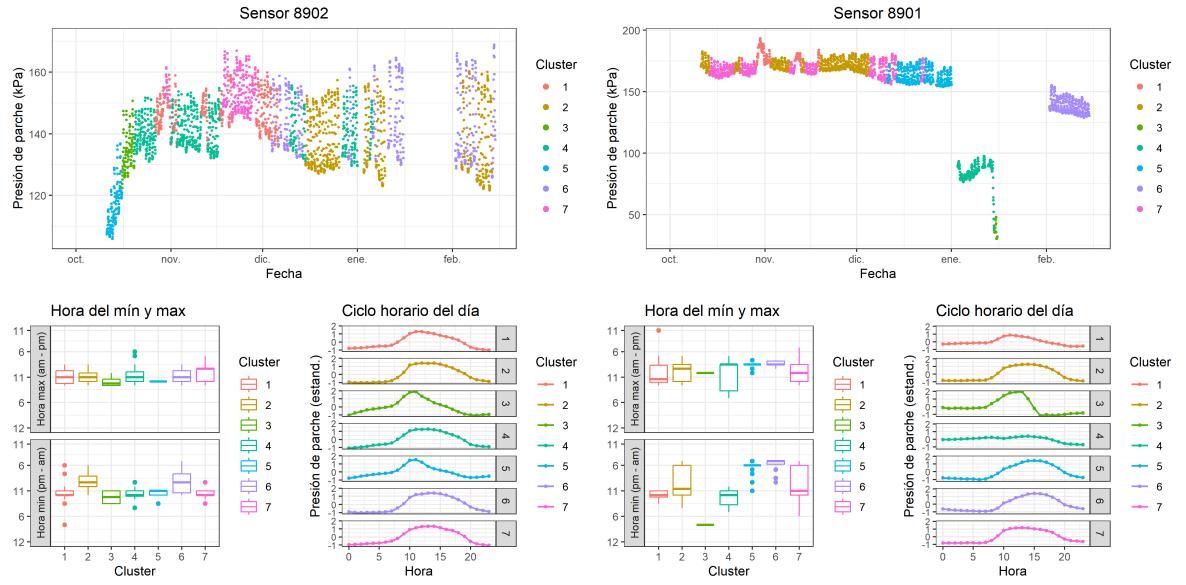
56 T4 (2023-2024)



Unidad 1



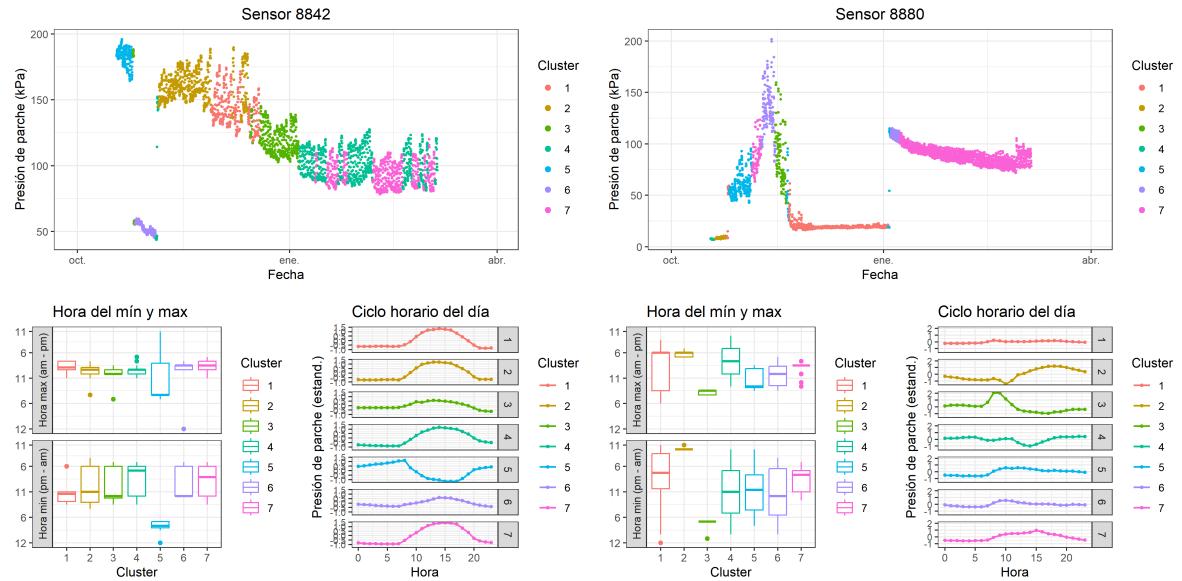
Unidad 2



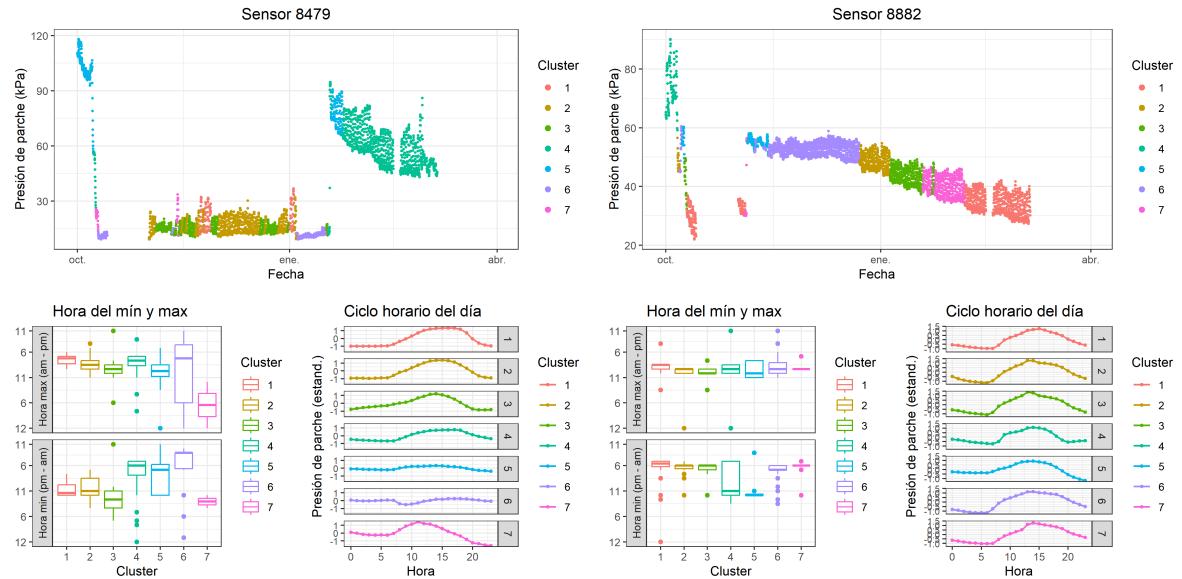
Unidad 3

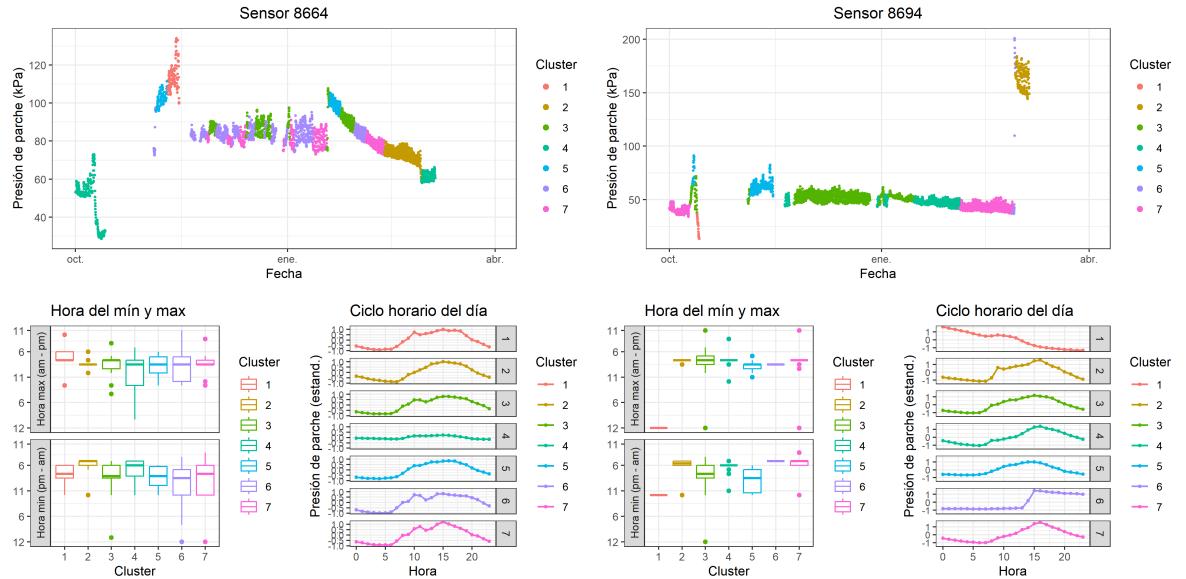
56.1 Rio Claro

57 T1 (2022-2023)



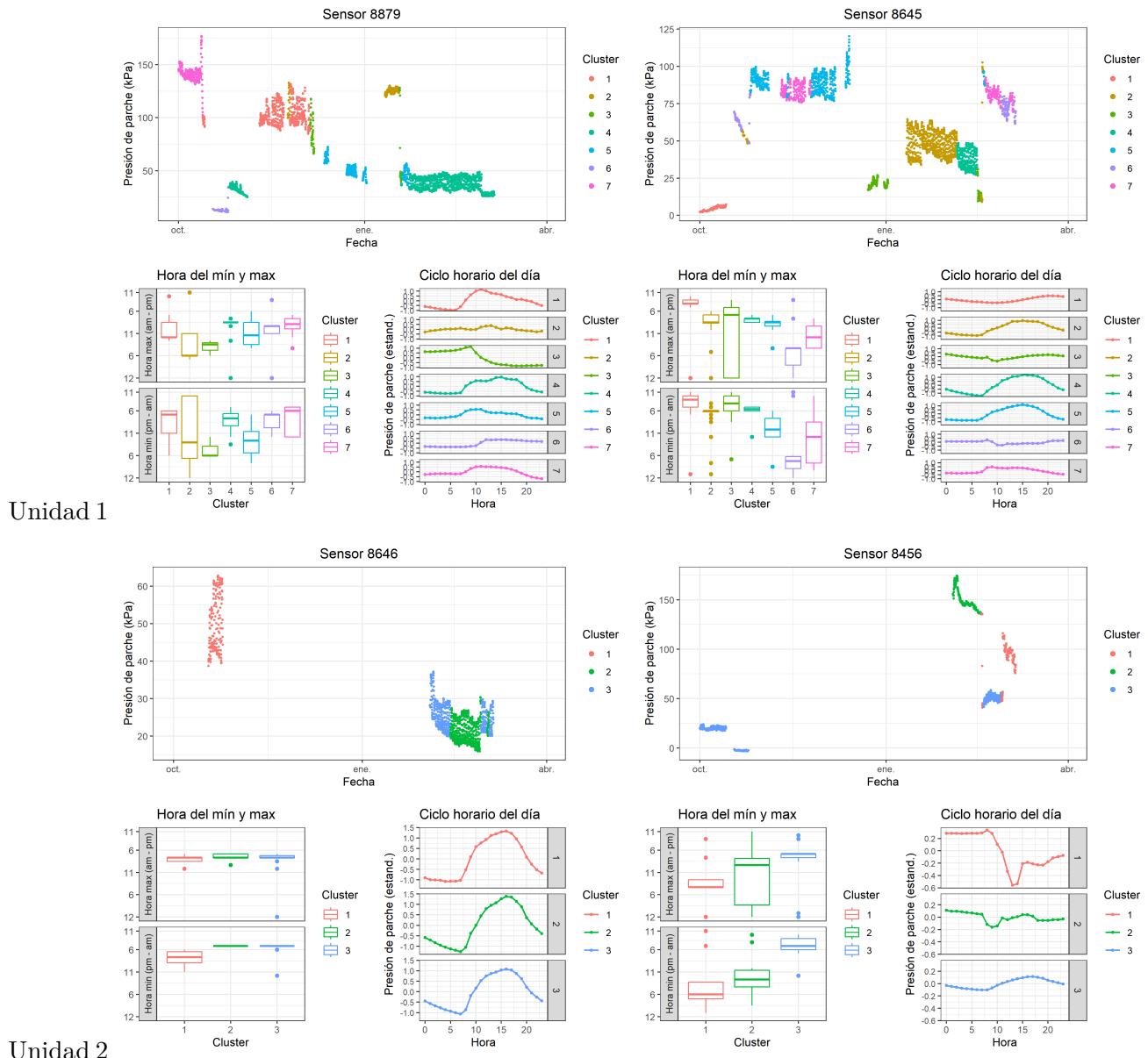
Unidad 1

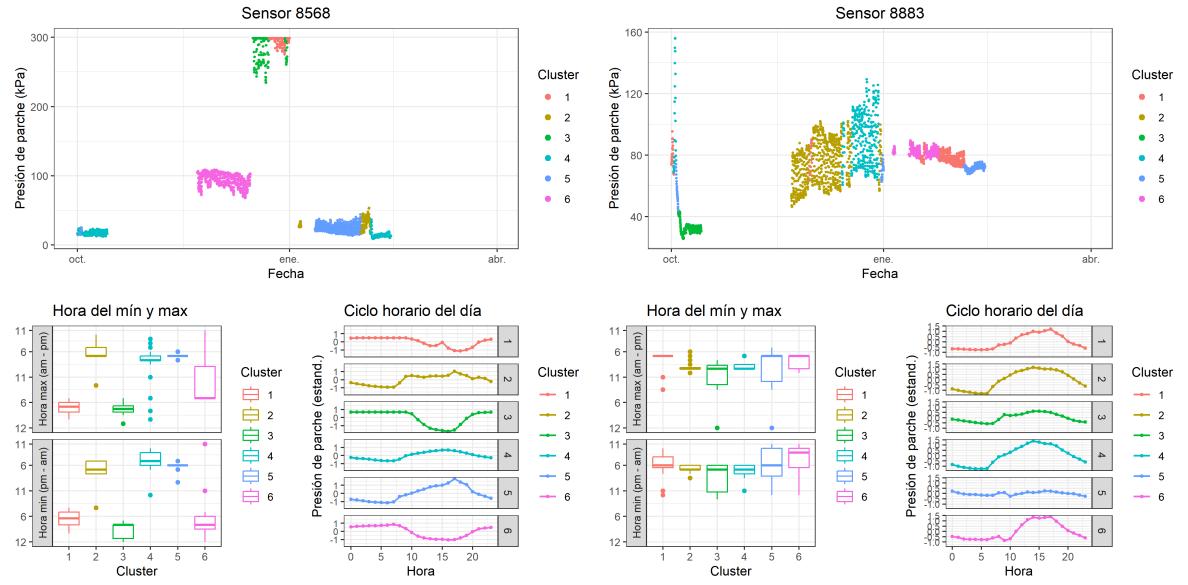




Unidad 3

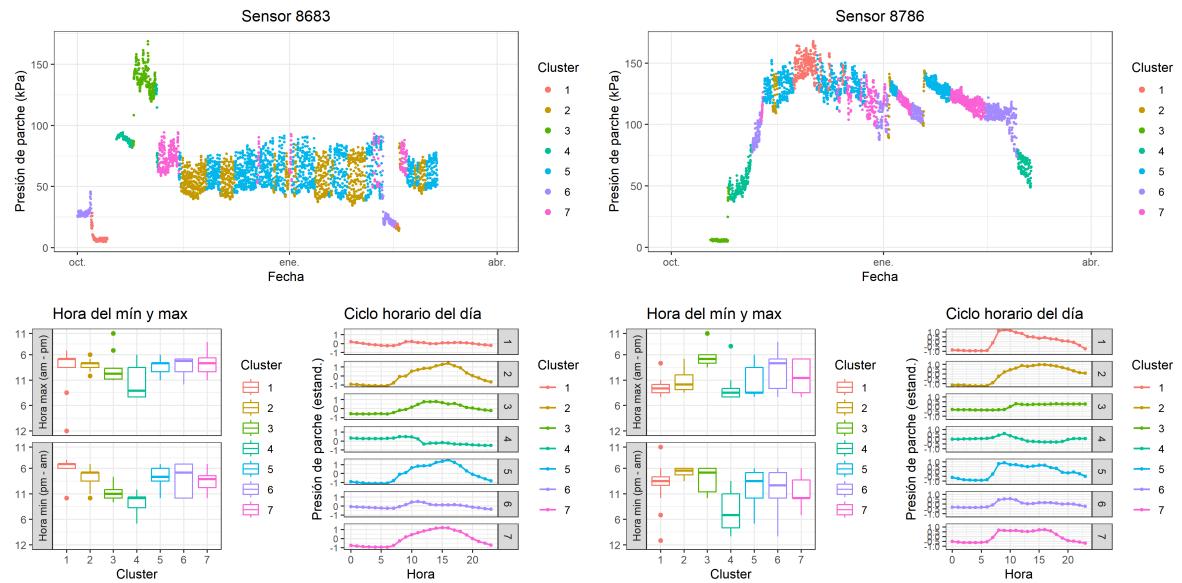
58 T2 (2022-2023)



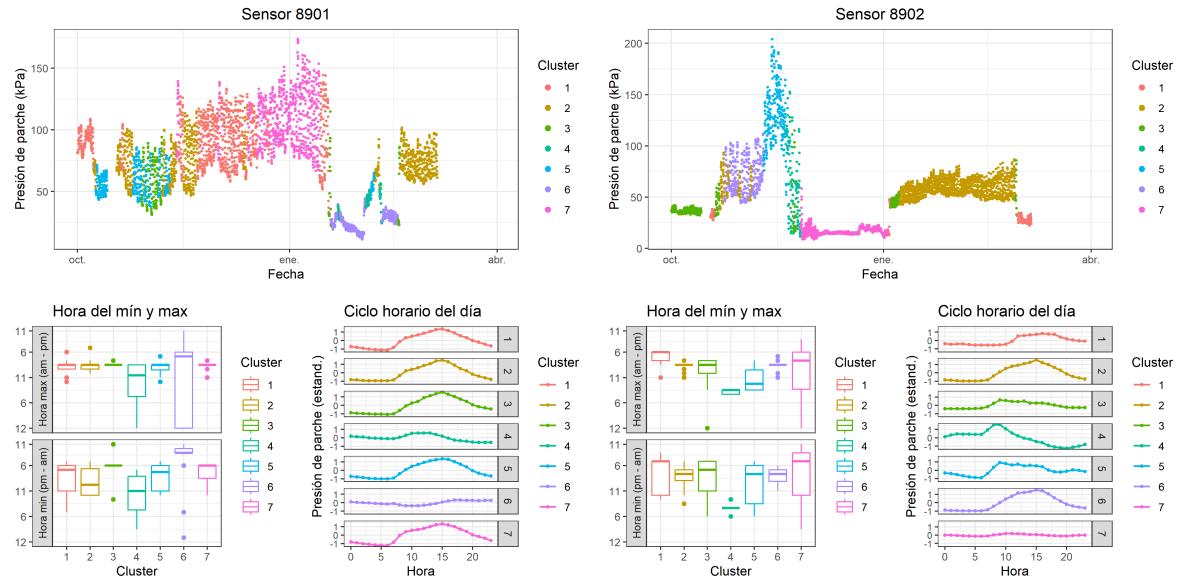


Unidad 3

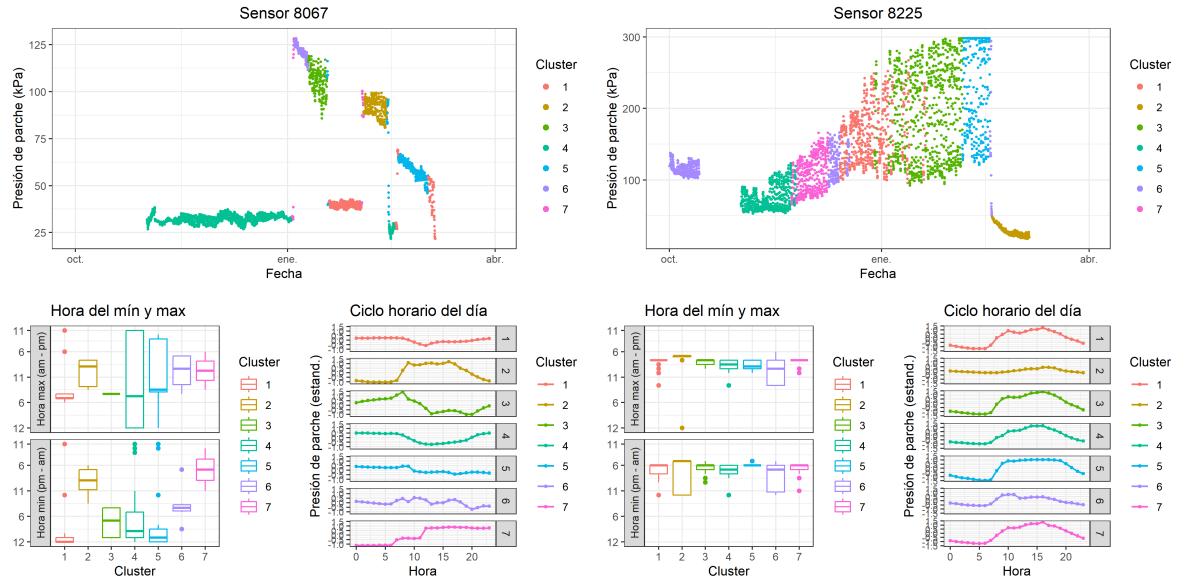
59 T3 (2022-2023)



Unidad 1

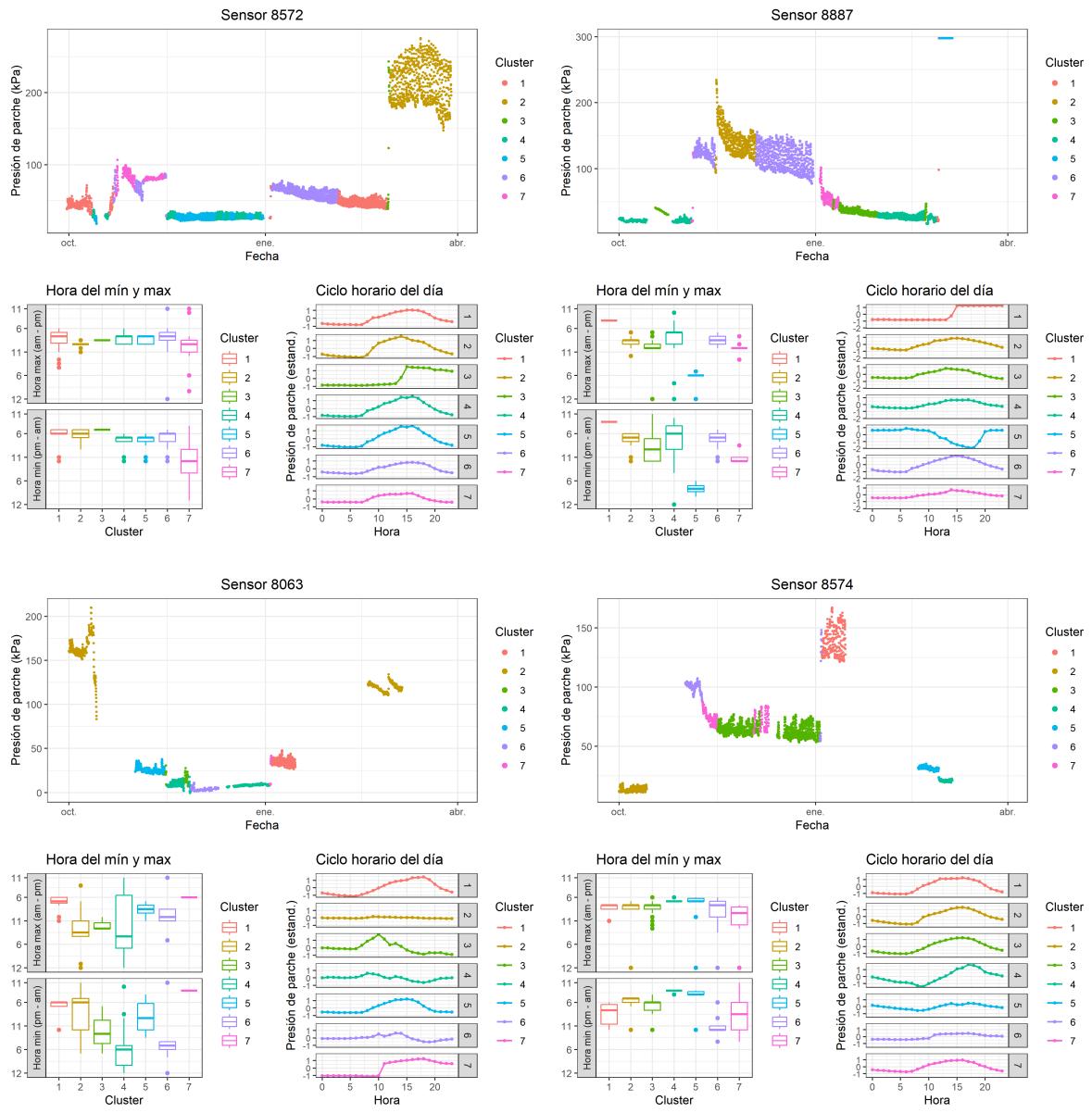


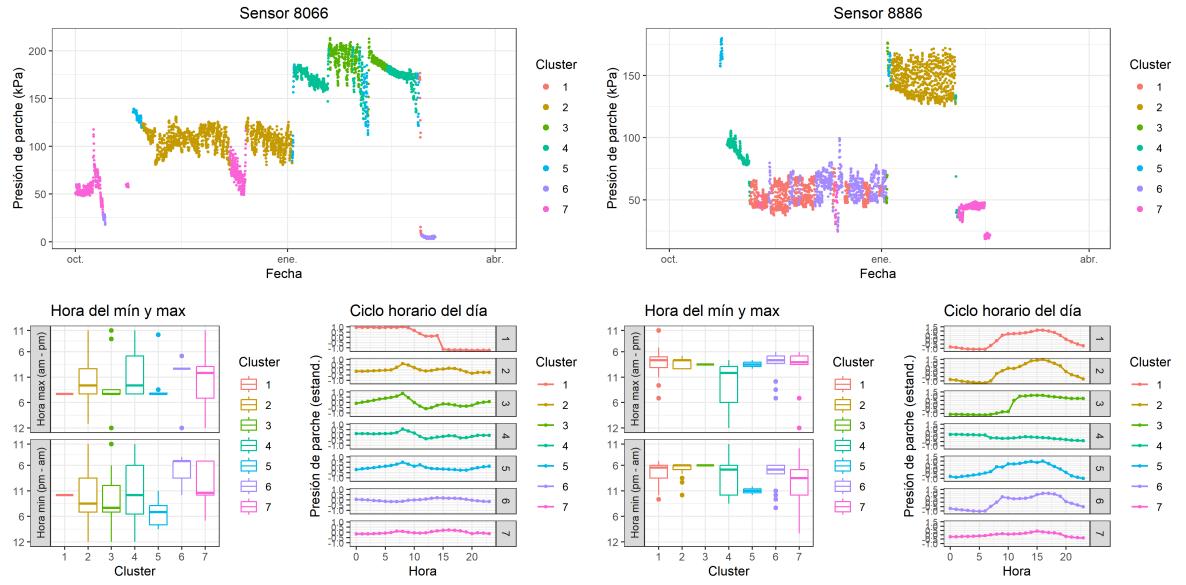
Unidad 2



Unidad 3

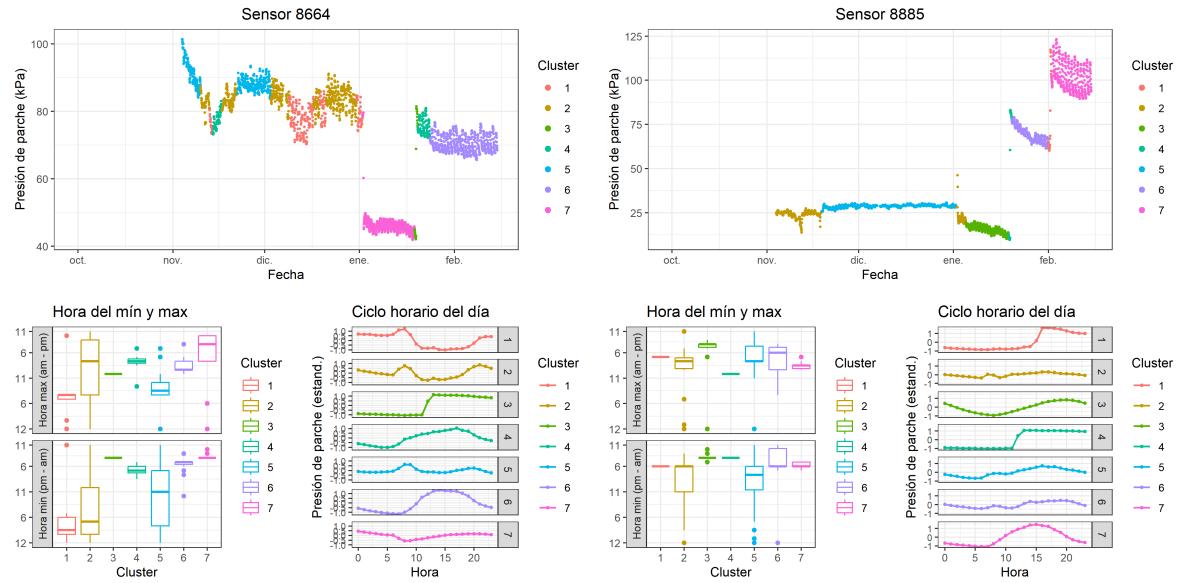
60 T4 (2022-2023)



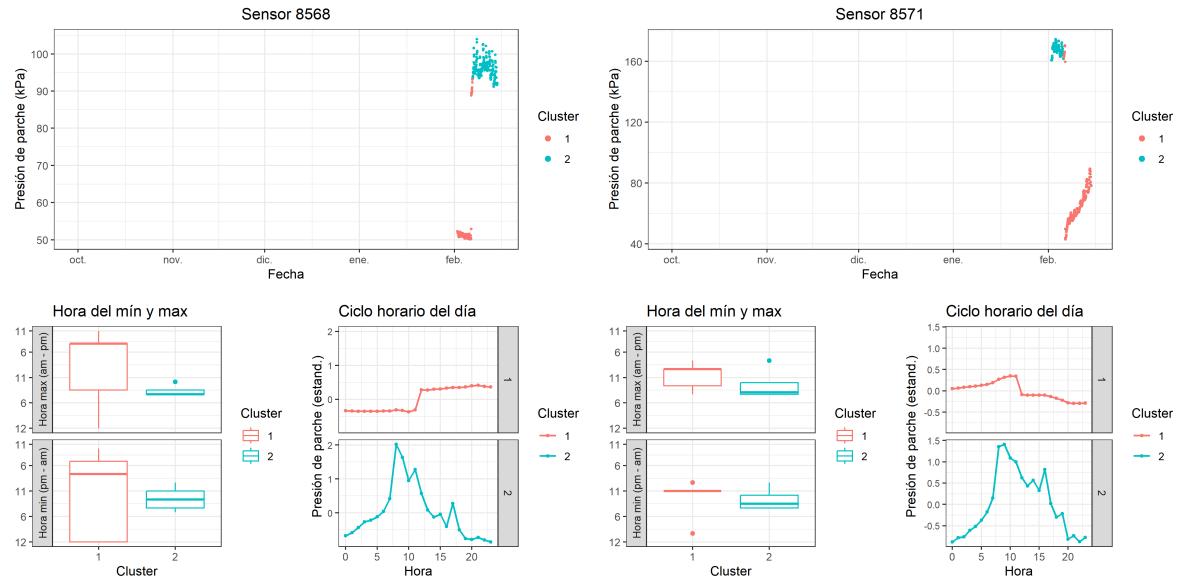


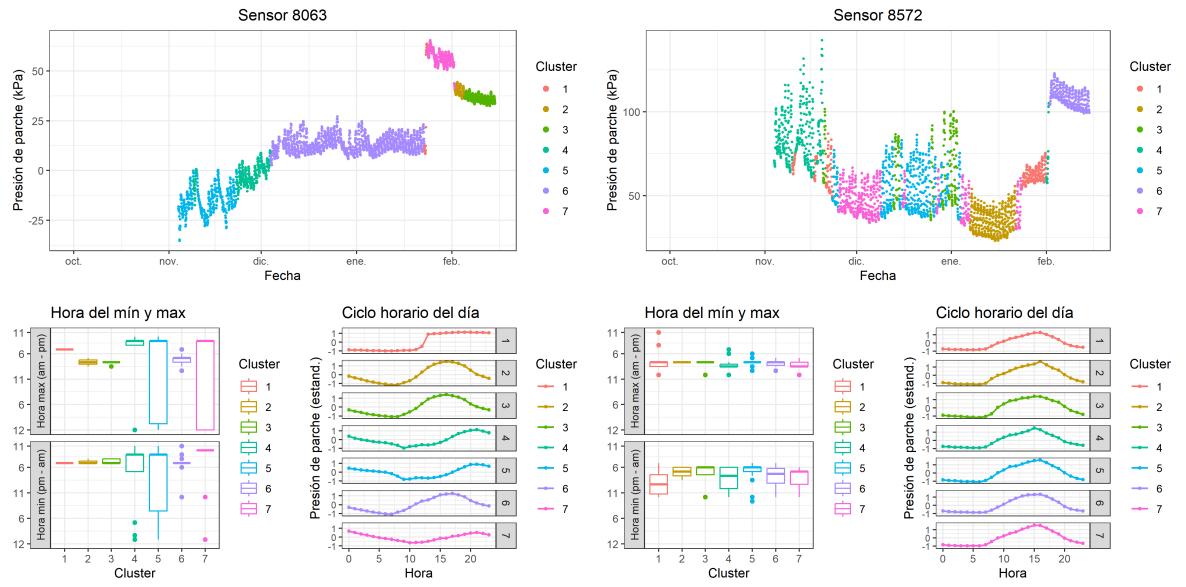
Unidad 3

61 T1 (2023-2024)



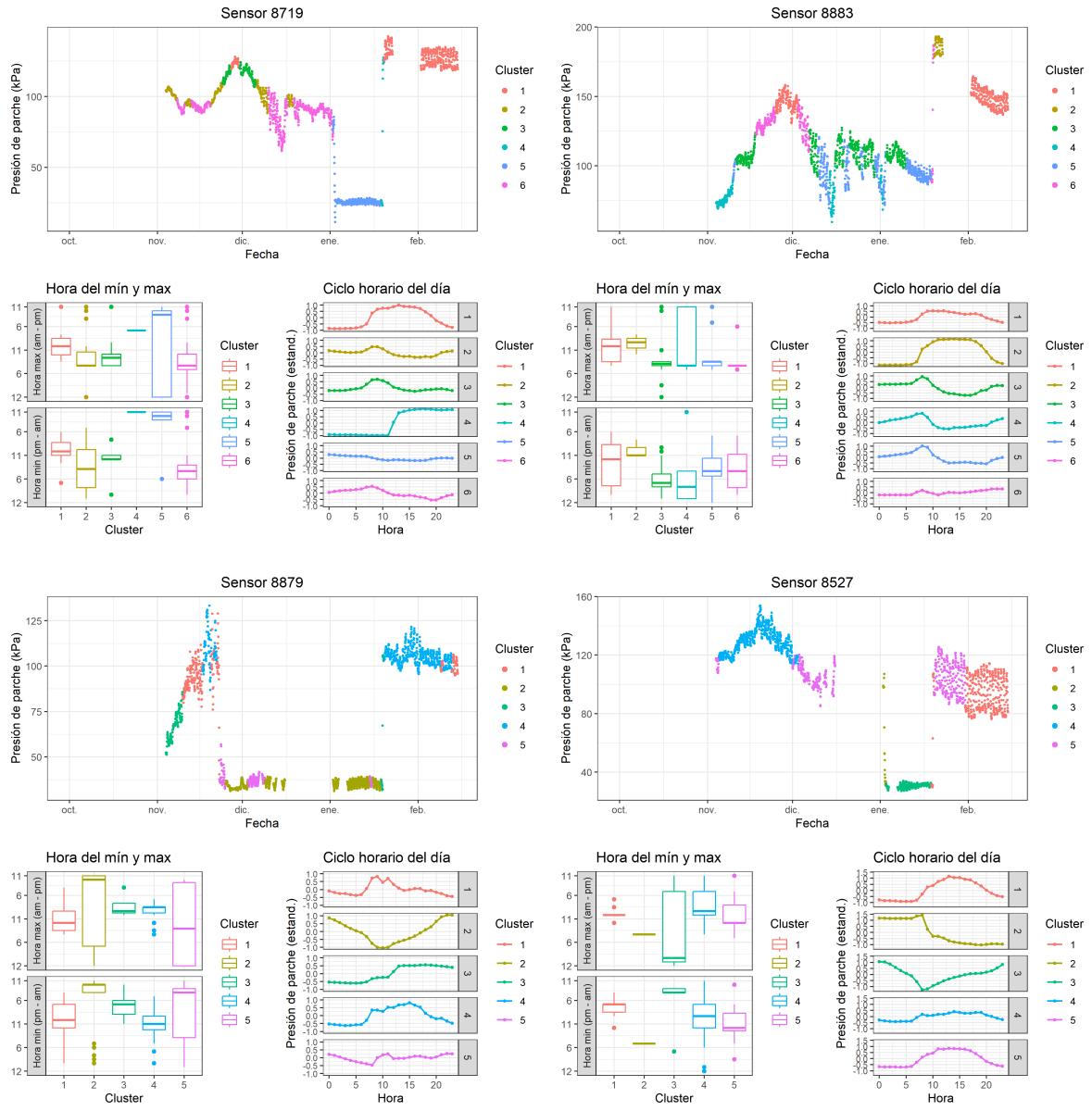
Unidad 1

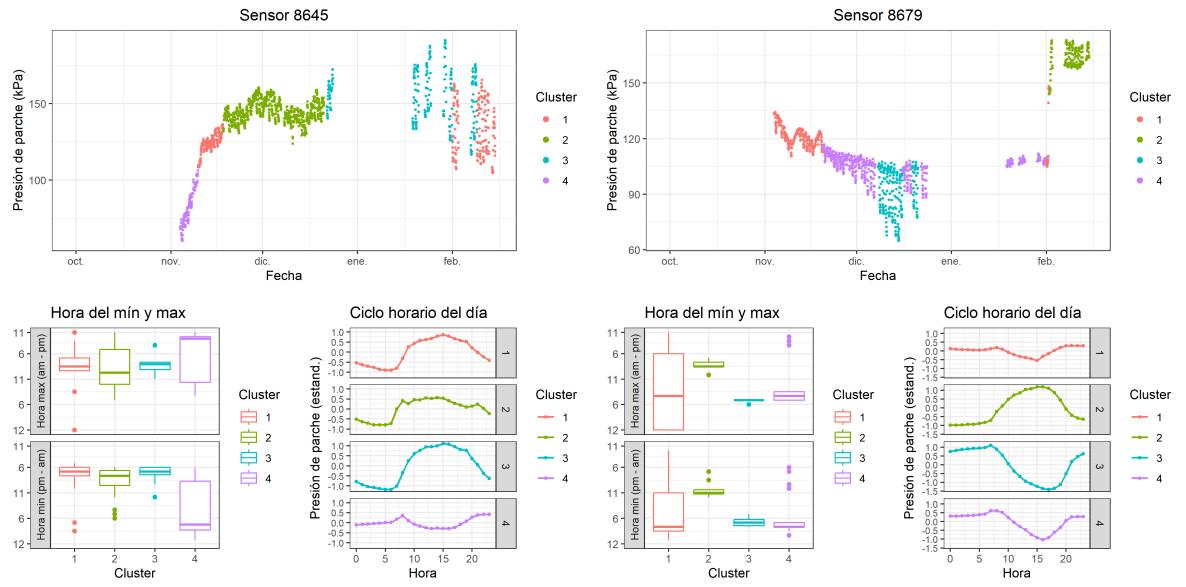




Unidad 3

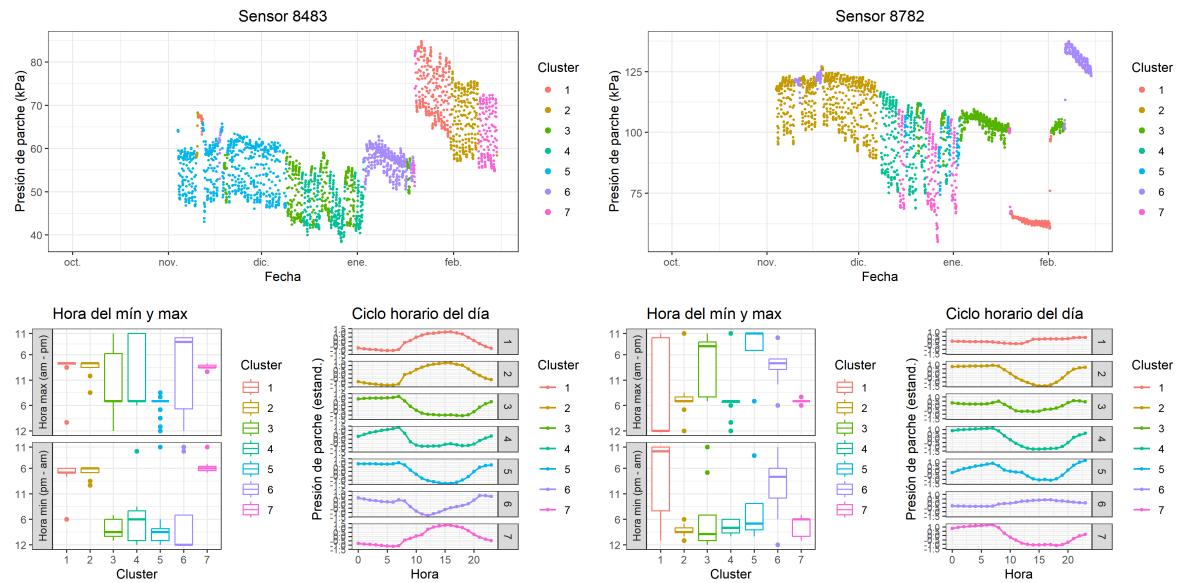
62 T2 (2023-2024)



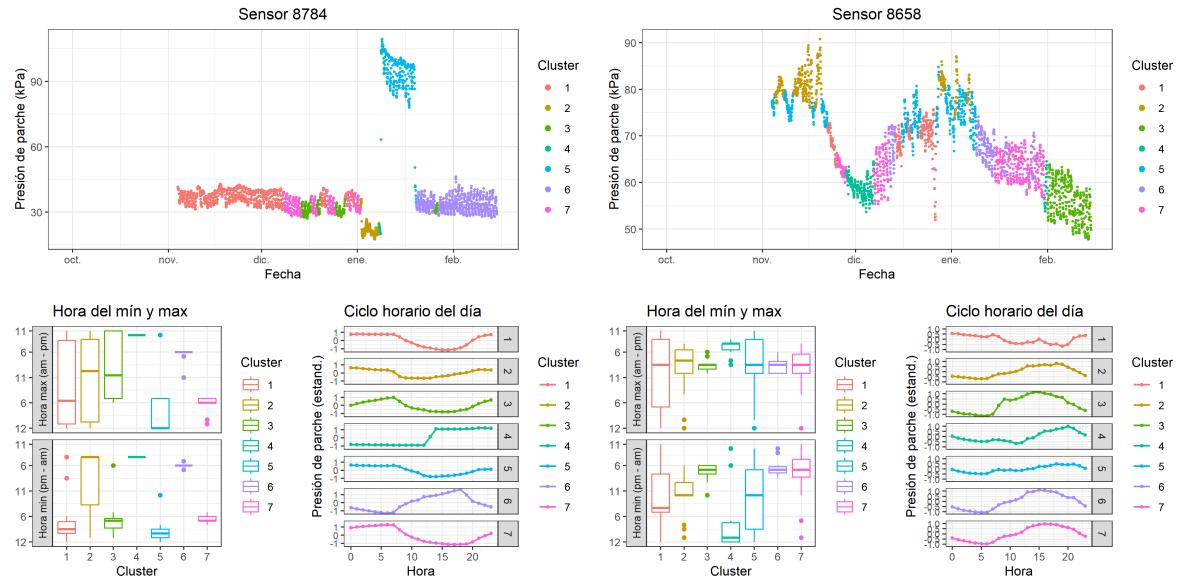


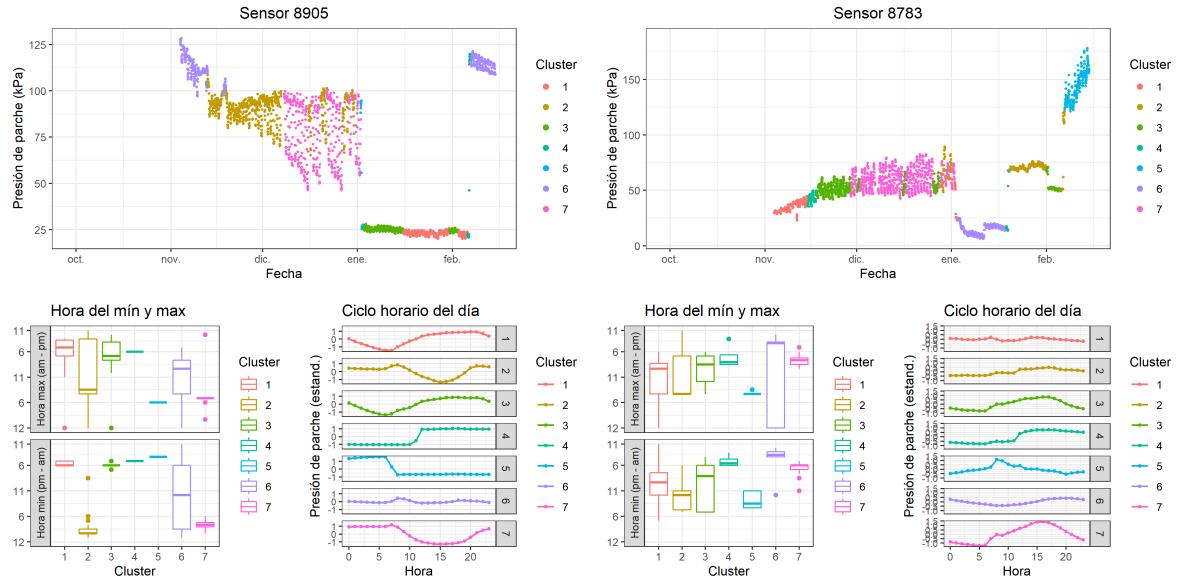
Unidad 3

63 T3 (2023-2024)



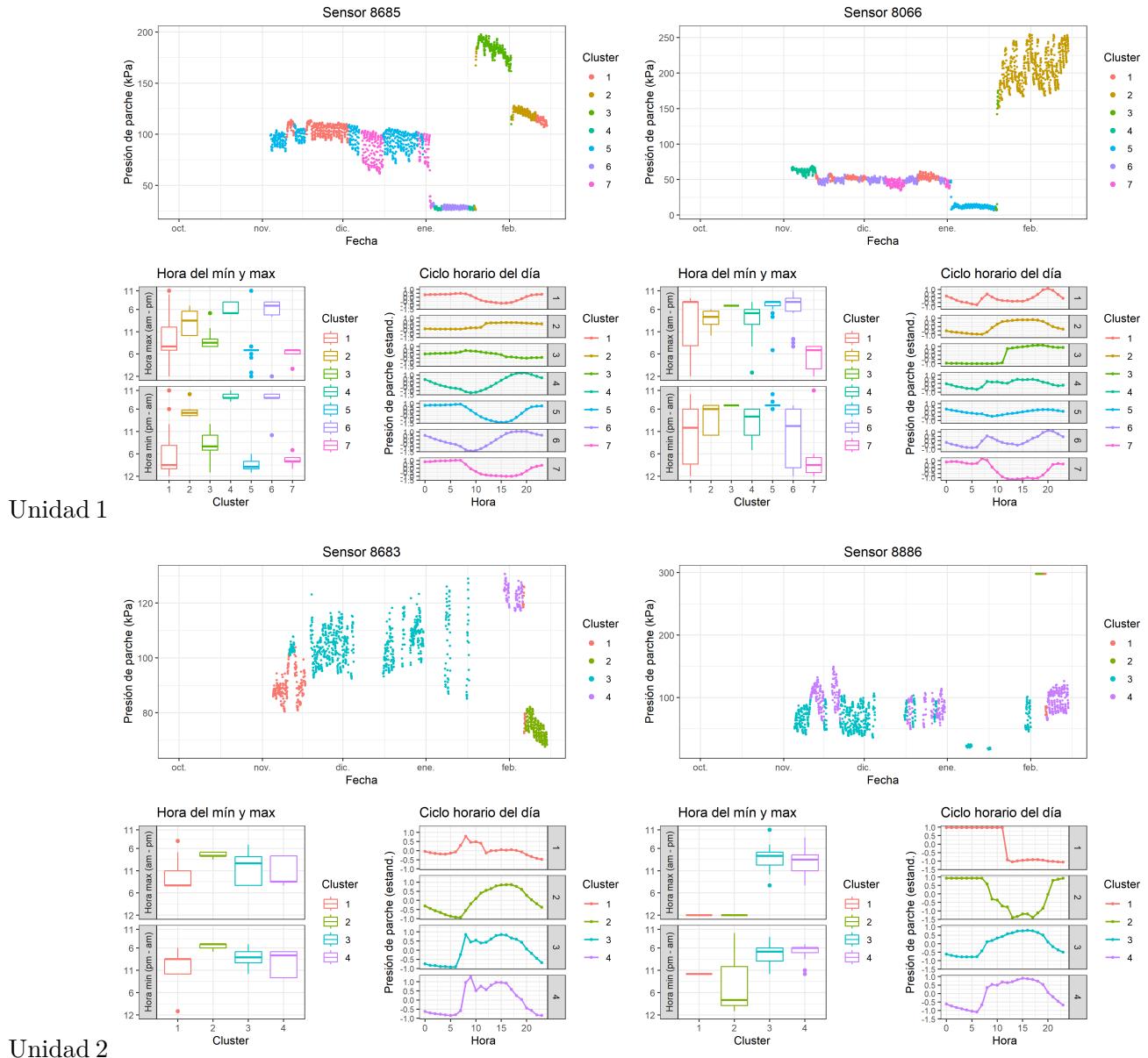
Unidad 1

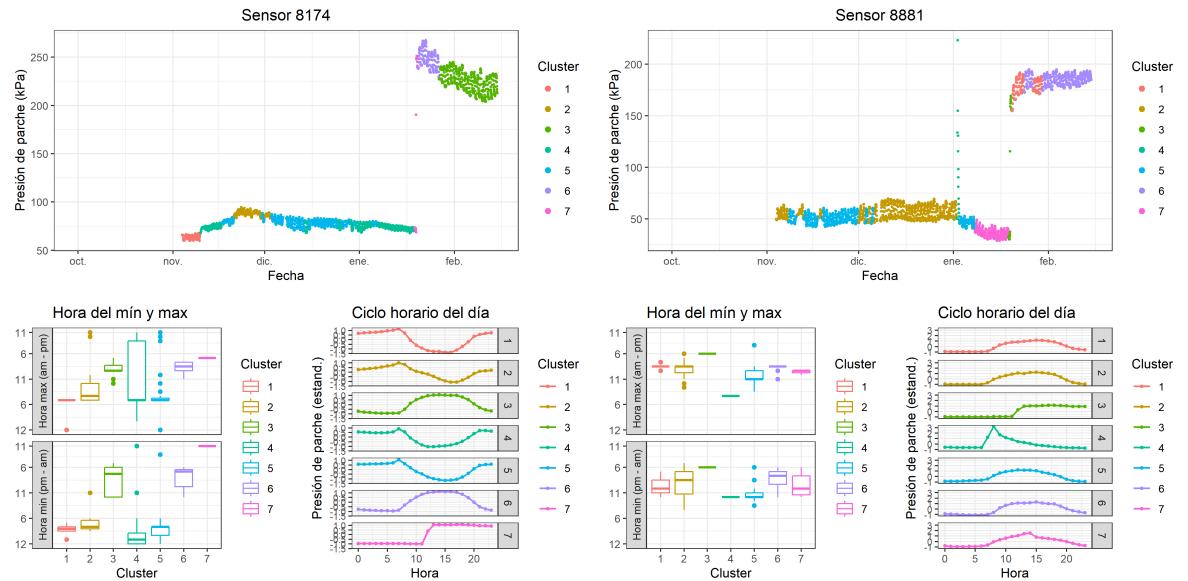




Unidad 3

64 T4 (2023-2024)





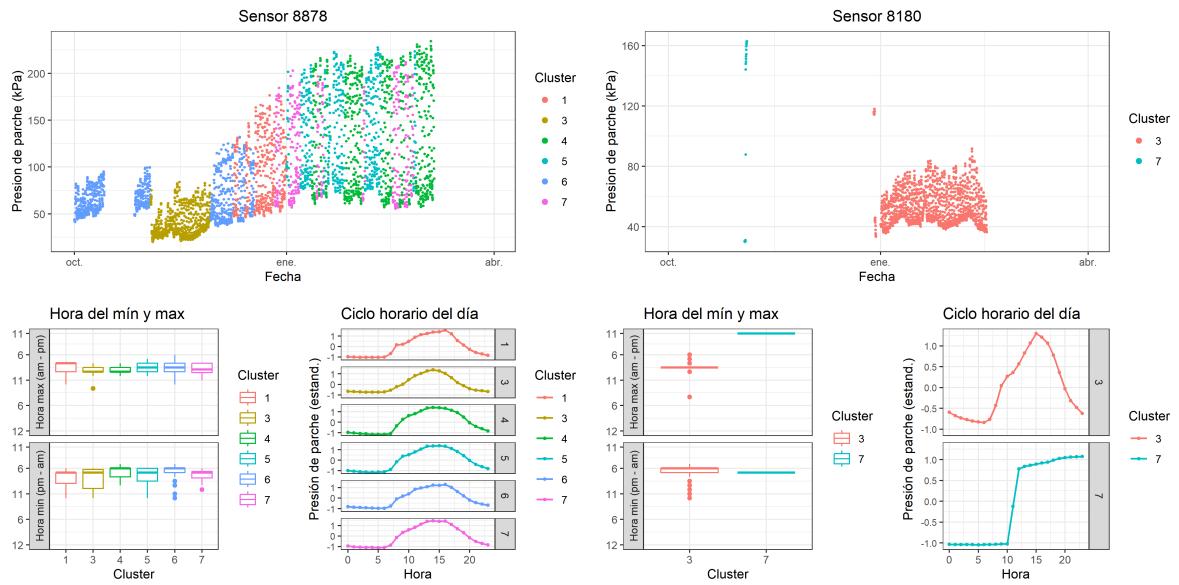
Unidad 3

65 Limpieza de datos: eliminación de clusters

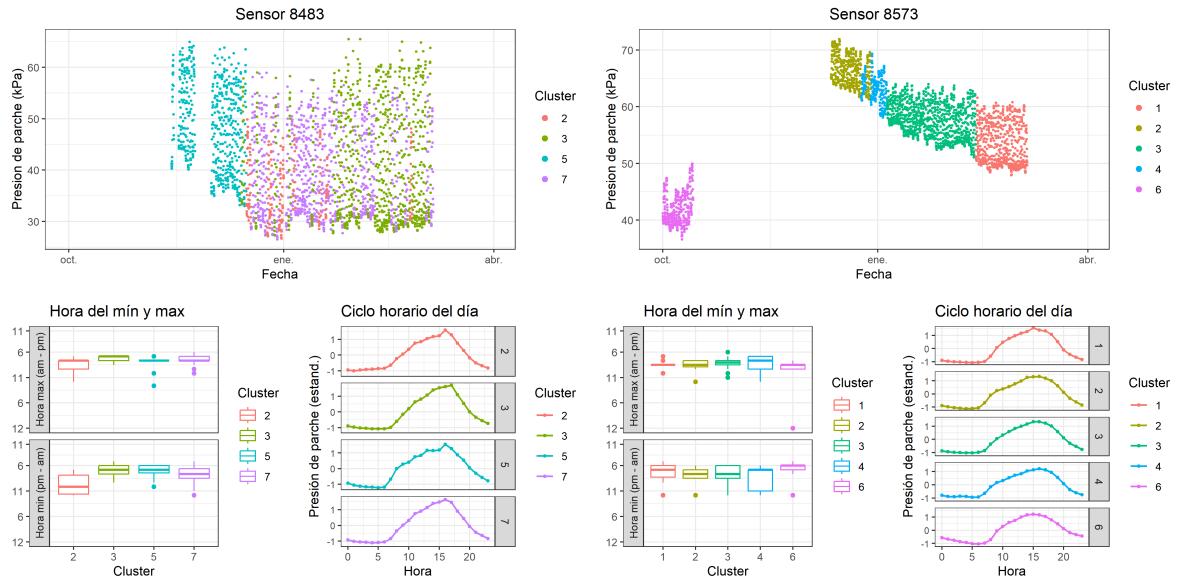
Para limpiar los datos de turgor, se emplearon series temporales de VPD y temperatura provenientes de las estaciones meteorológicas de los dos sitios de estudio. Se procedió a calcular el coeficiente de correlación entre cada cluster y los valores de VPD y temperatura respecto al tiempo (escala horaria) y el sitio. Se obtuvo un coeficiente de correlación promedio en relación con ambas variables, y se estableció un umbral de corte de $r > 0.5$. Aquellos clusters de turgor cuyo promedio de correlación resultó menor a 0.5 fueron descartados.

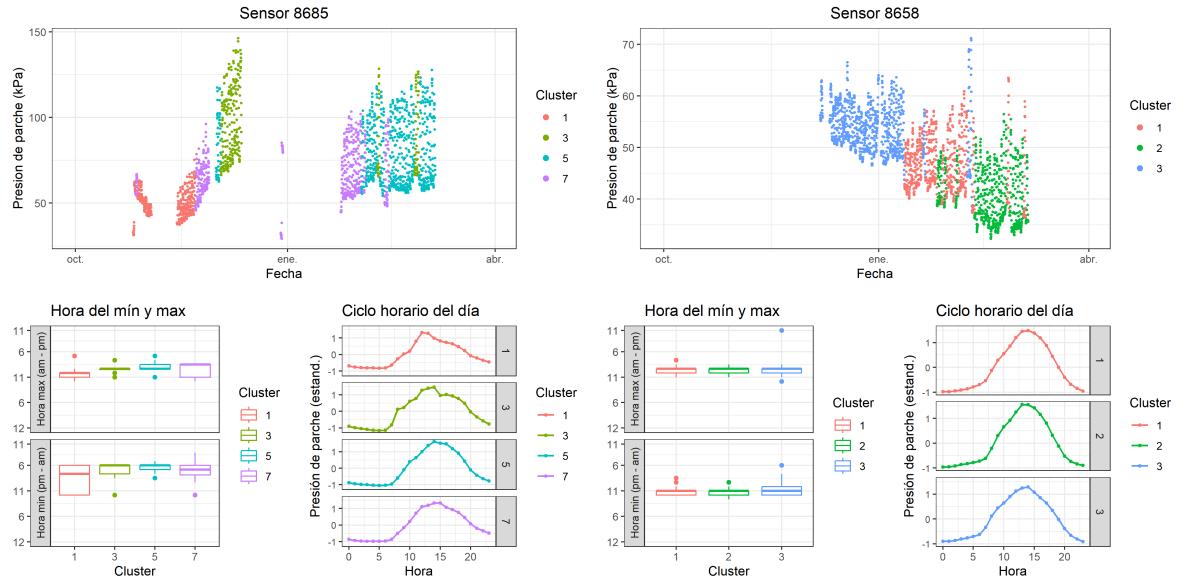
65.1 La Esperanza

66 T1 (2022-2023)

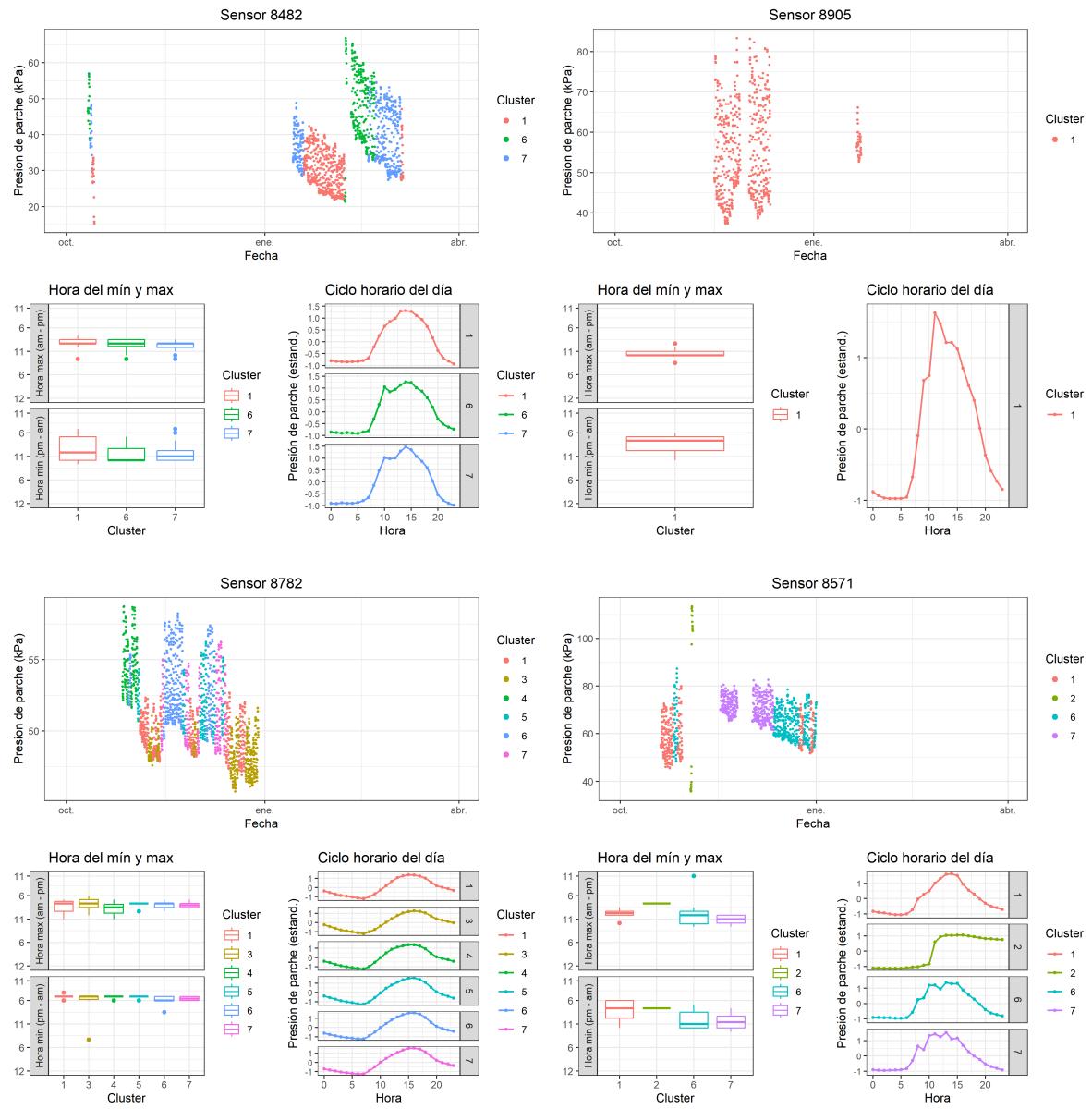


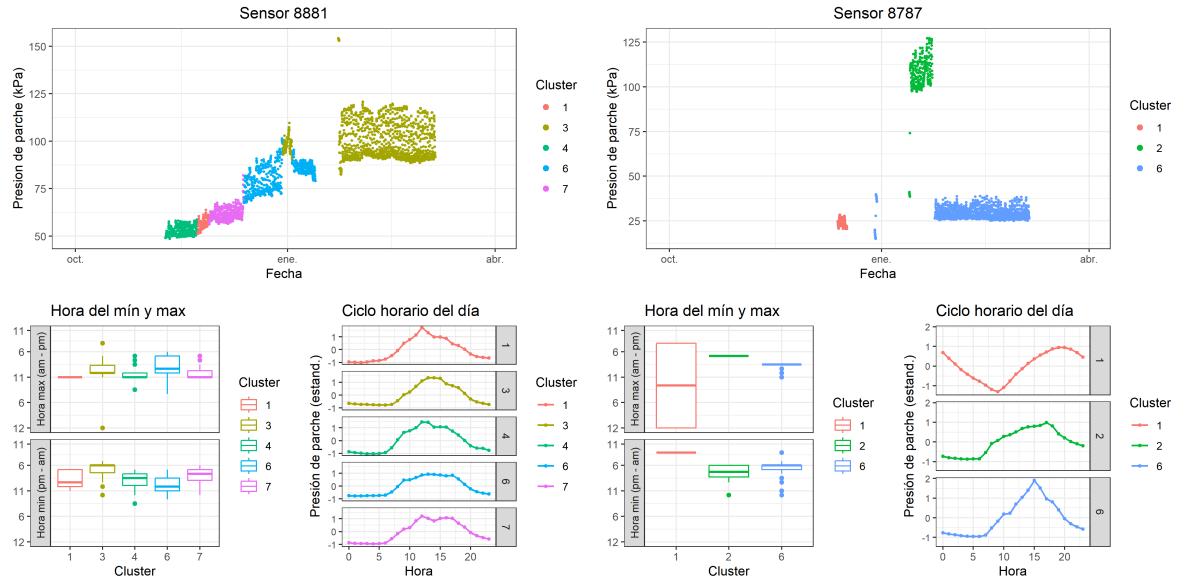
Unidad 1





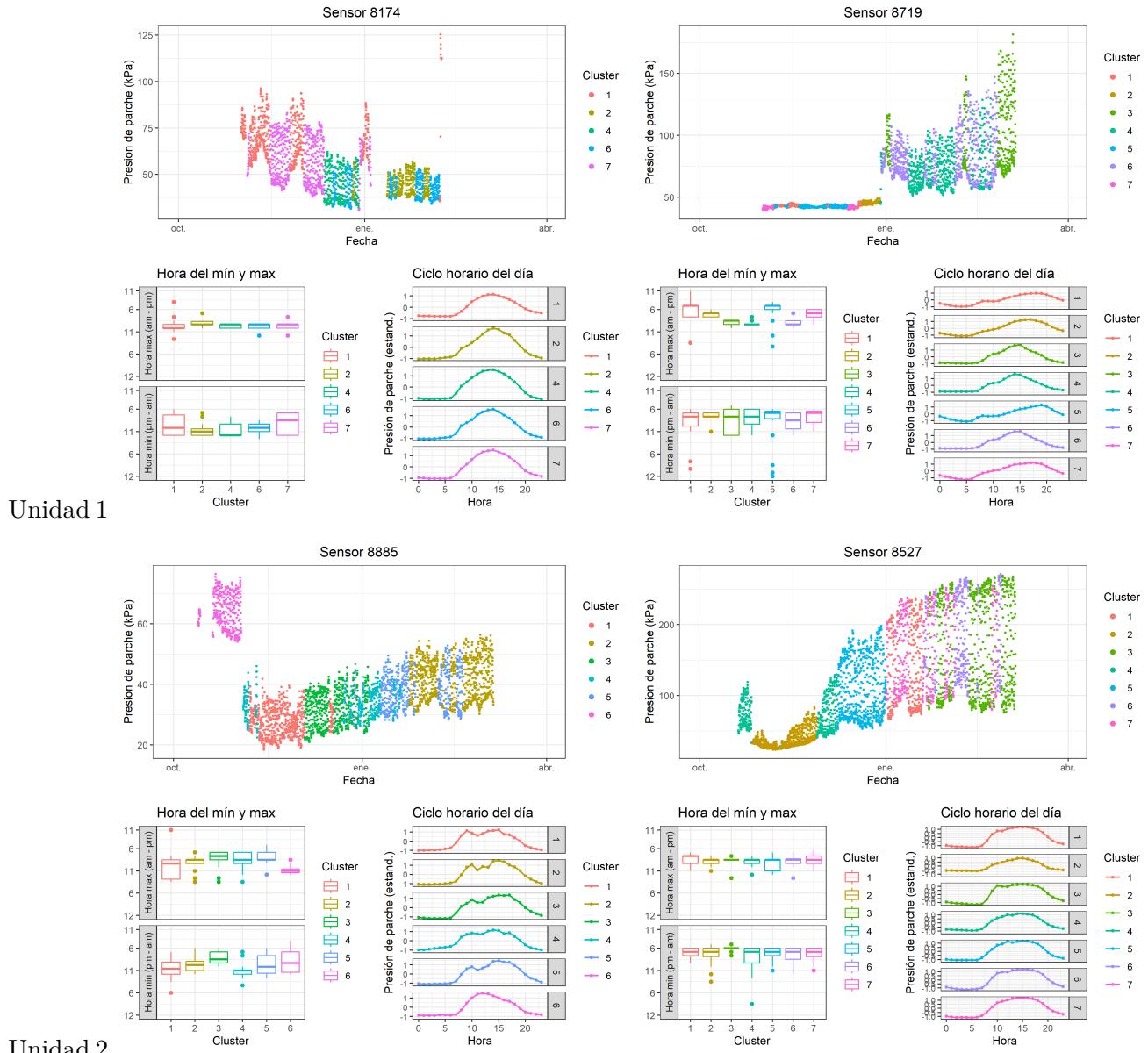
67 T2 (2022-2023)

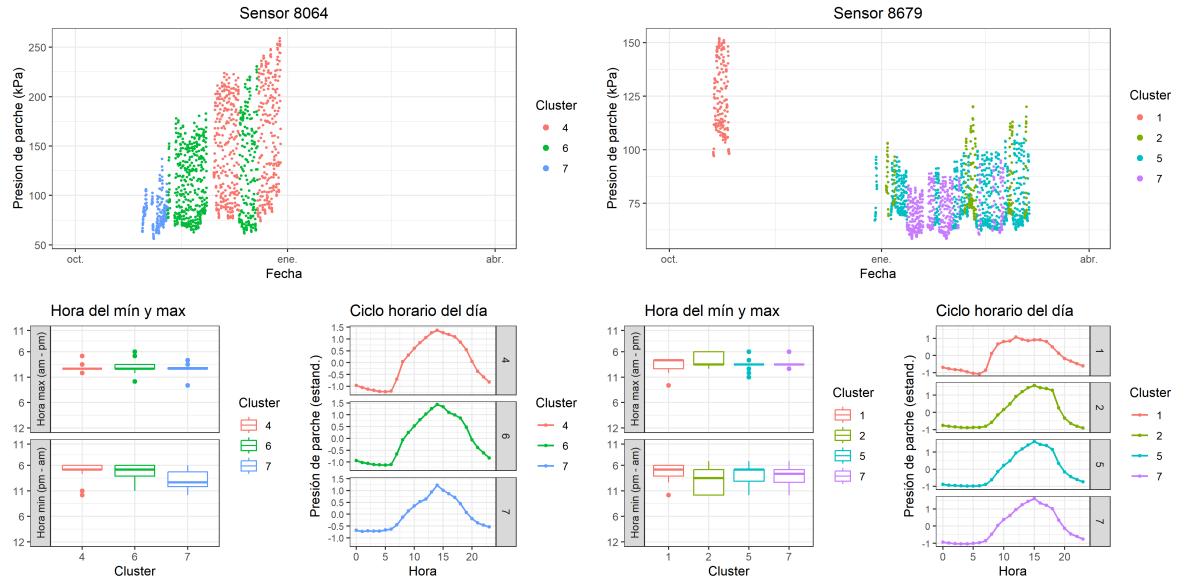




Unidad 3

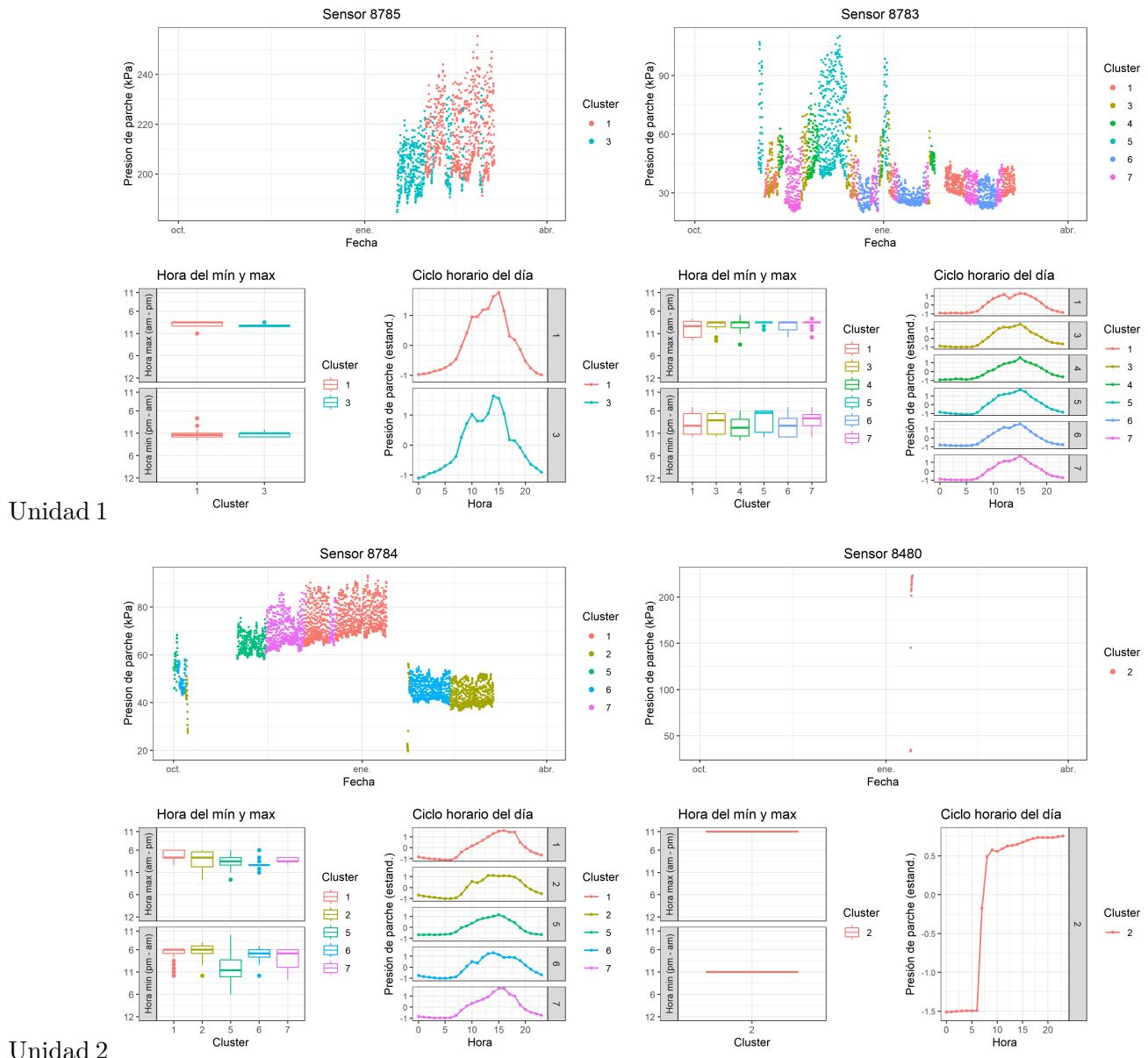
68 T3 (2022-2023)

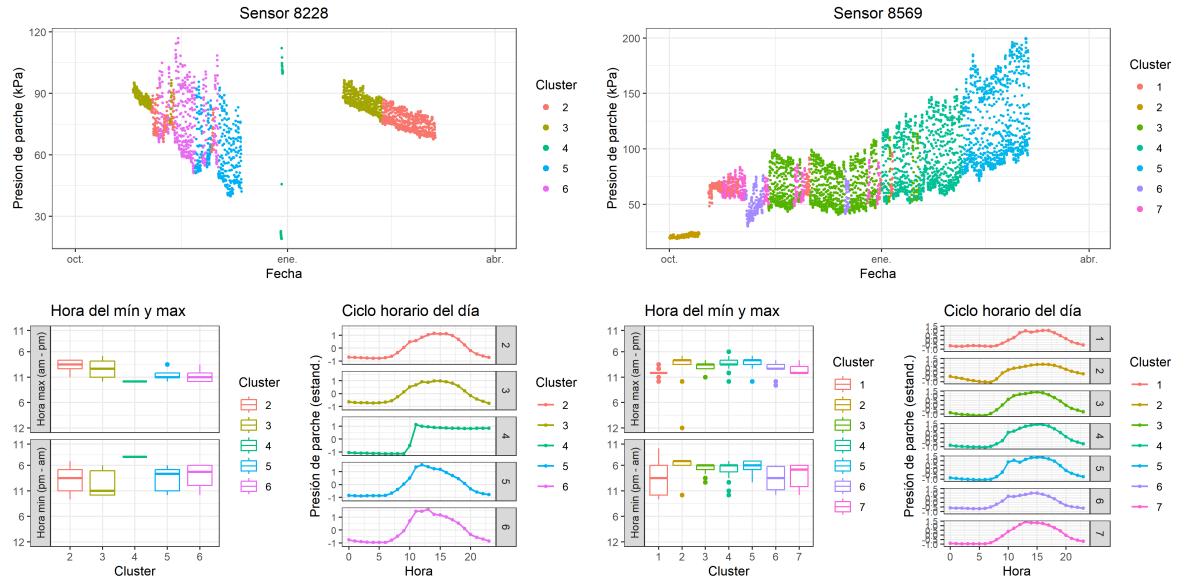




Unidad 3

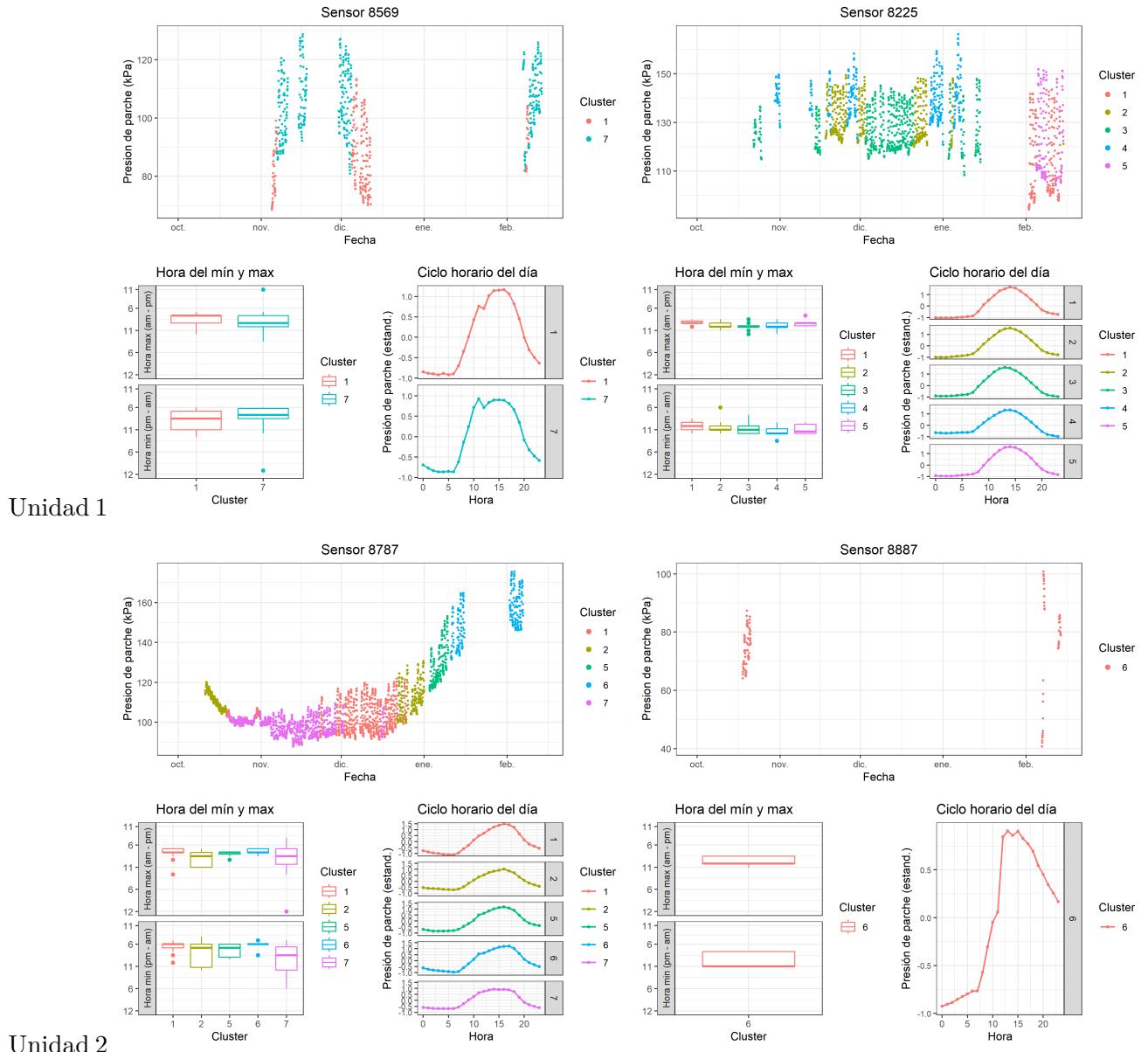
69 T4 (2022-2023)

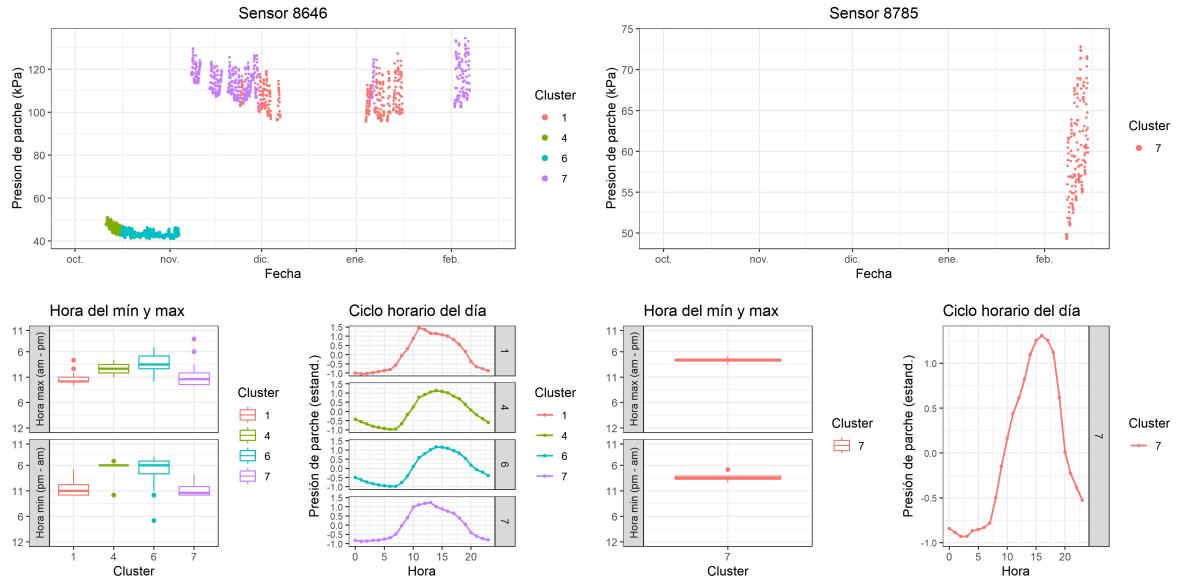




Unidad 3

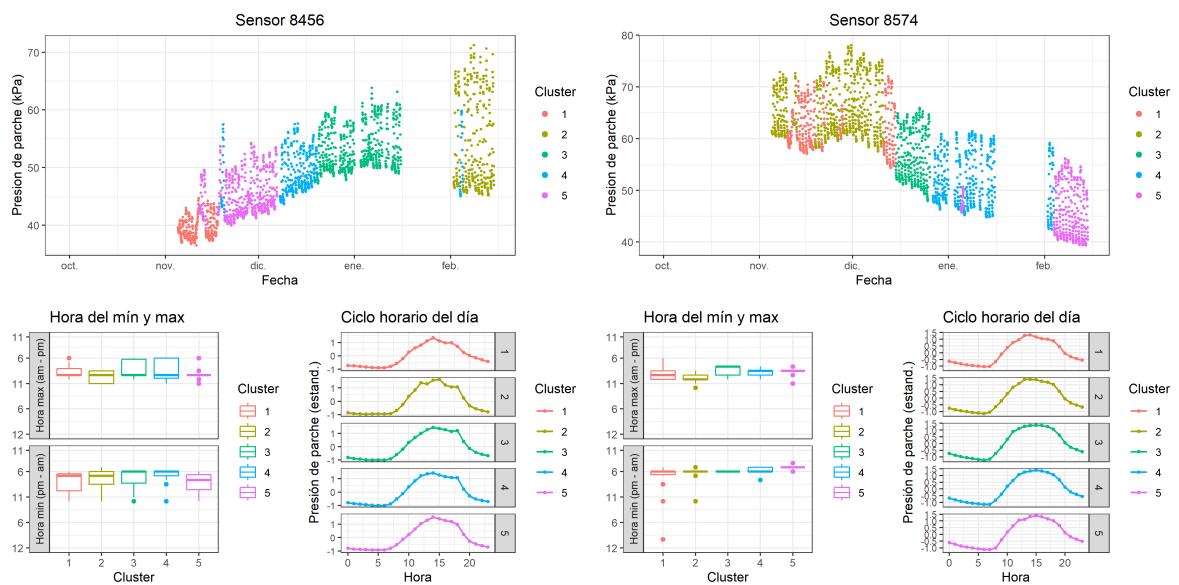
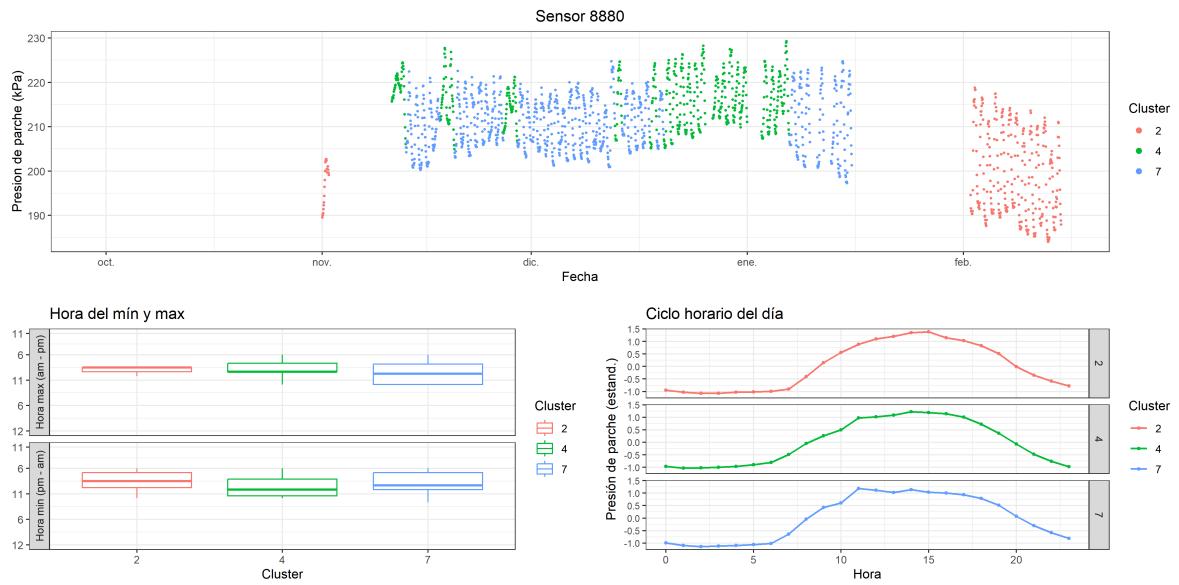
70 T1 (2023-2024)

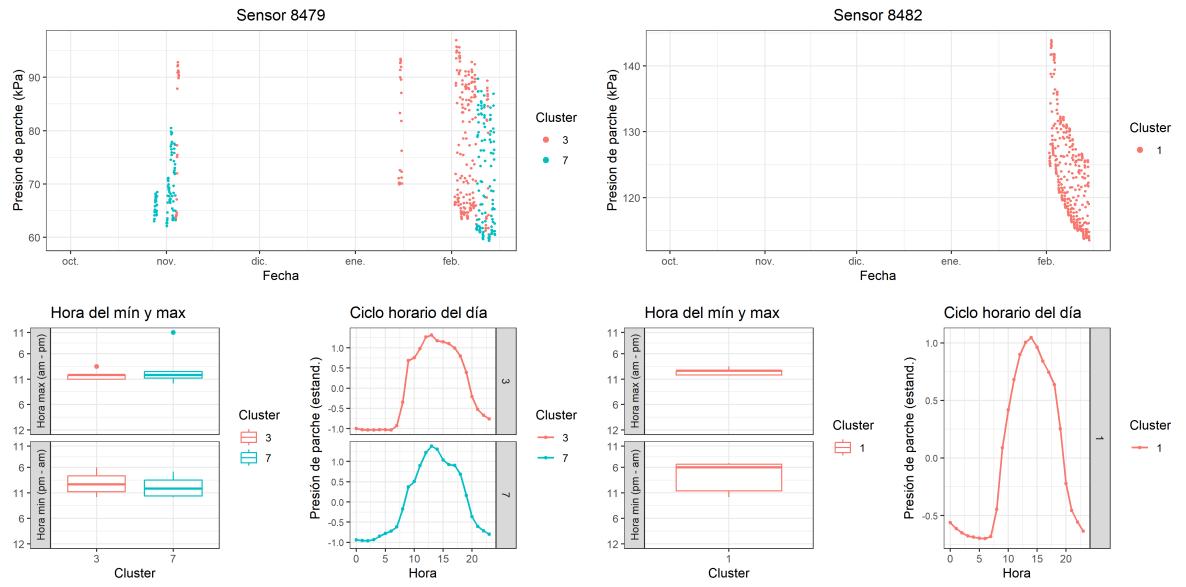




Unidad 3

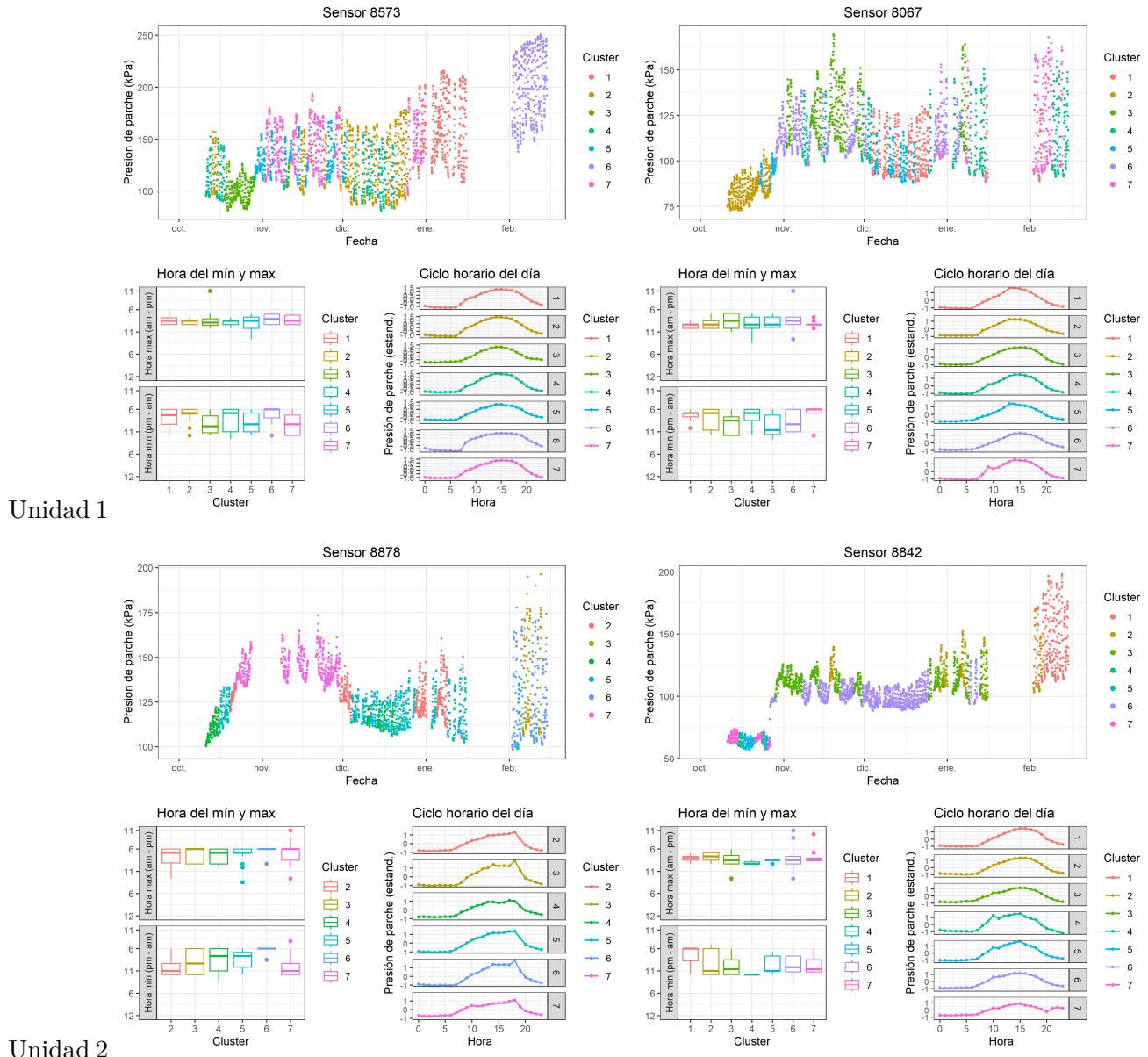
71 T2 (2023-2024)

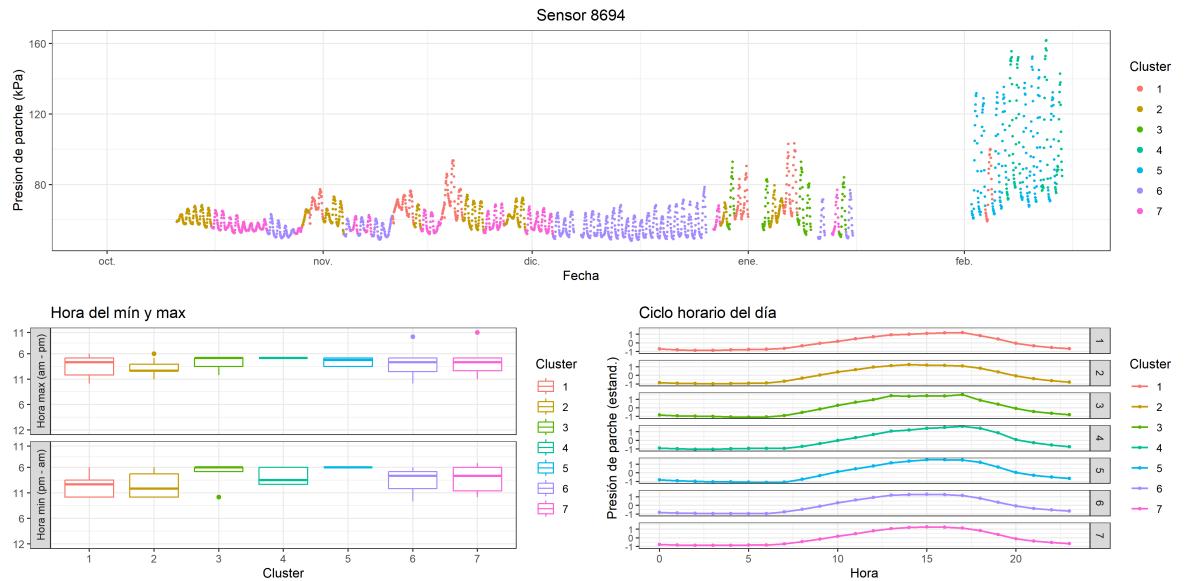




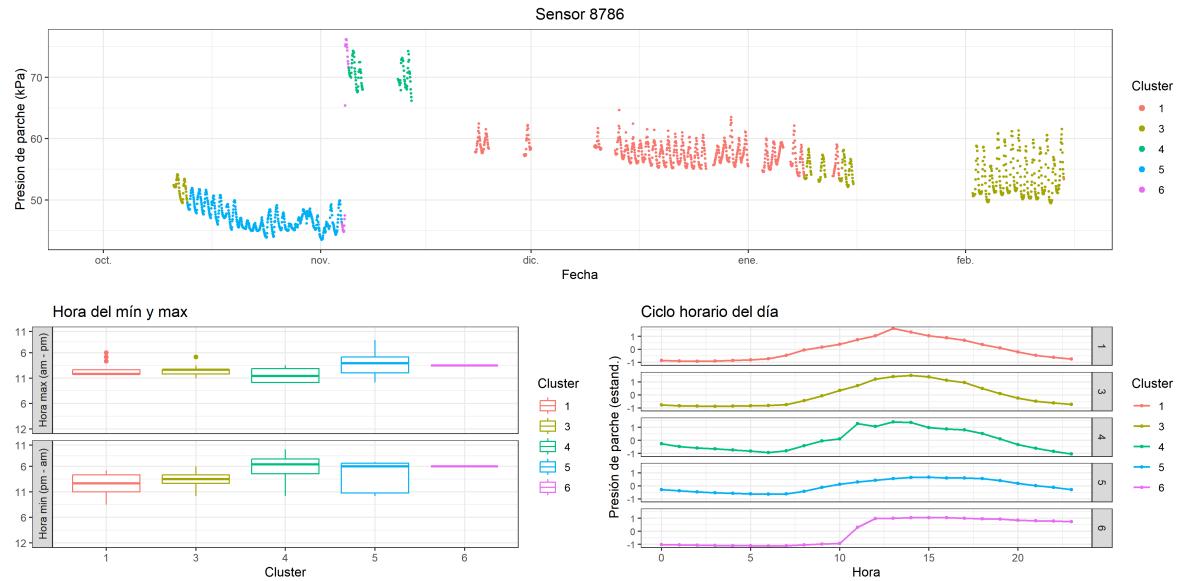
Unidad 3

72 T3 (2023-2024)

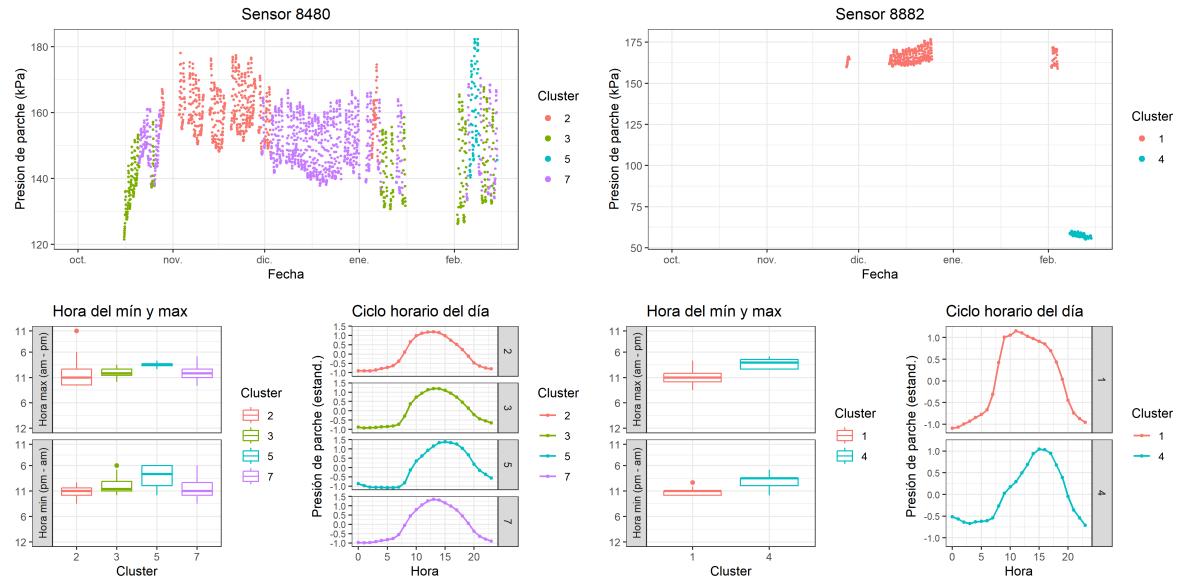




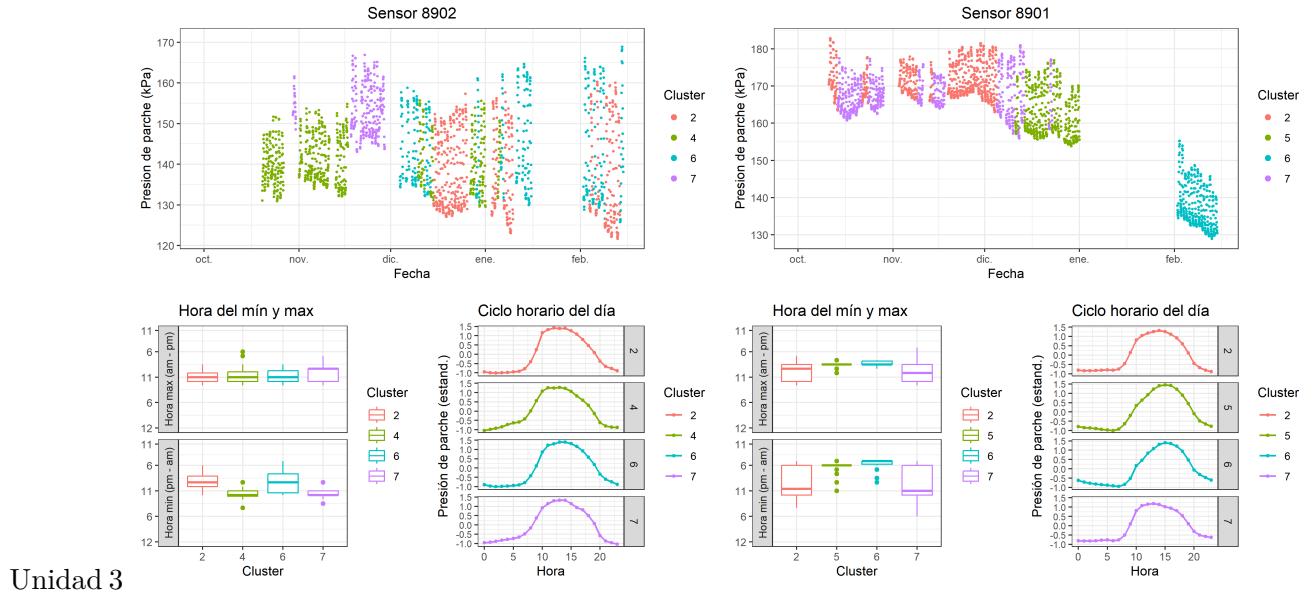
73 T4 (2023-2024)



Unidad 1



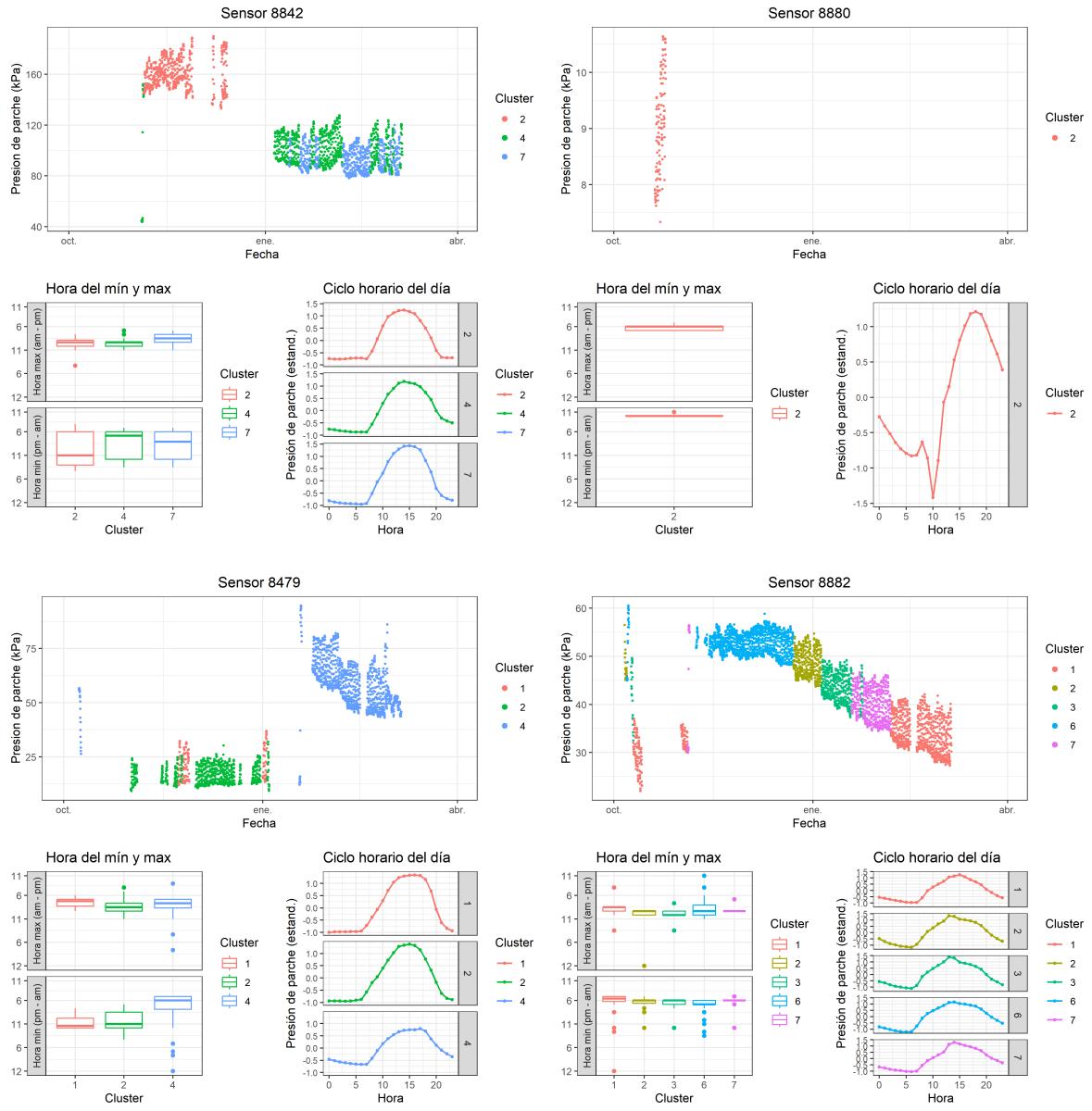
Unidad 2

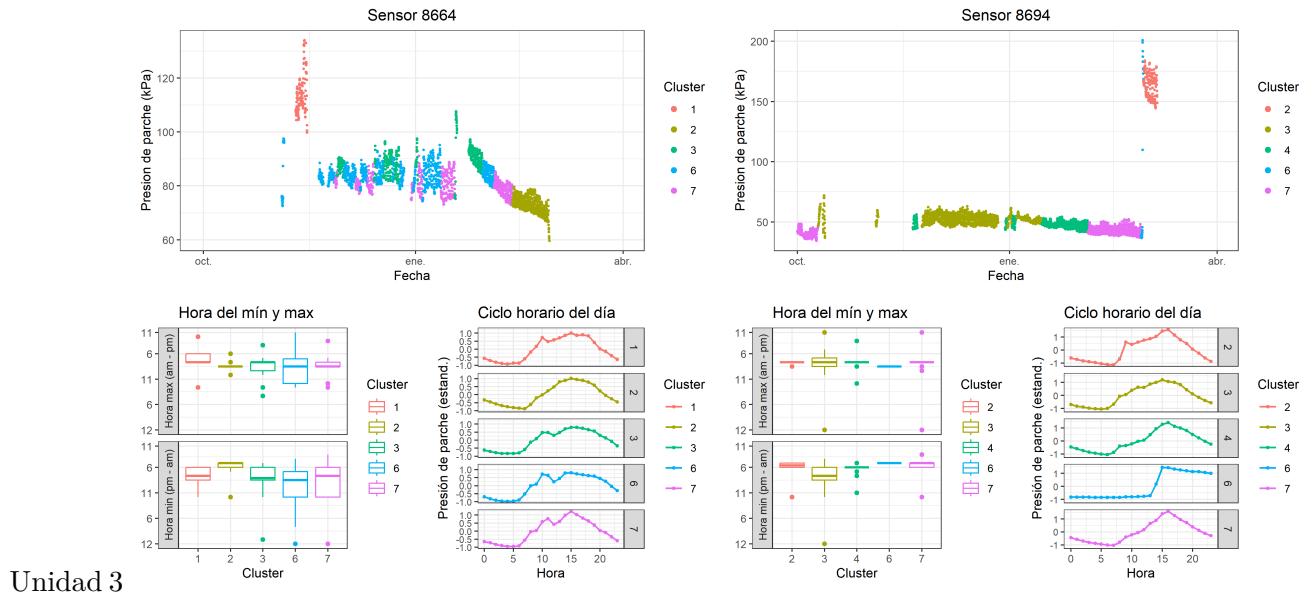


Unidad 3

73.1 Rio Claro

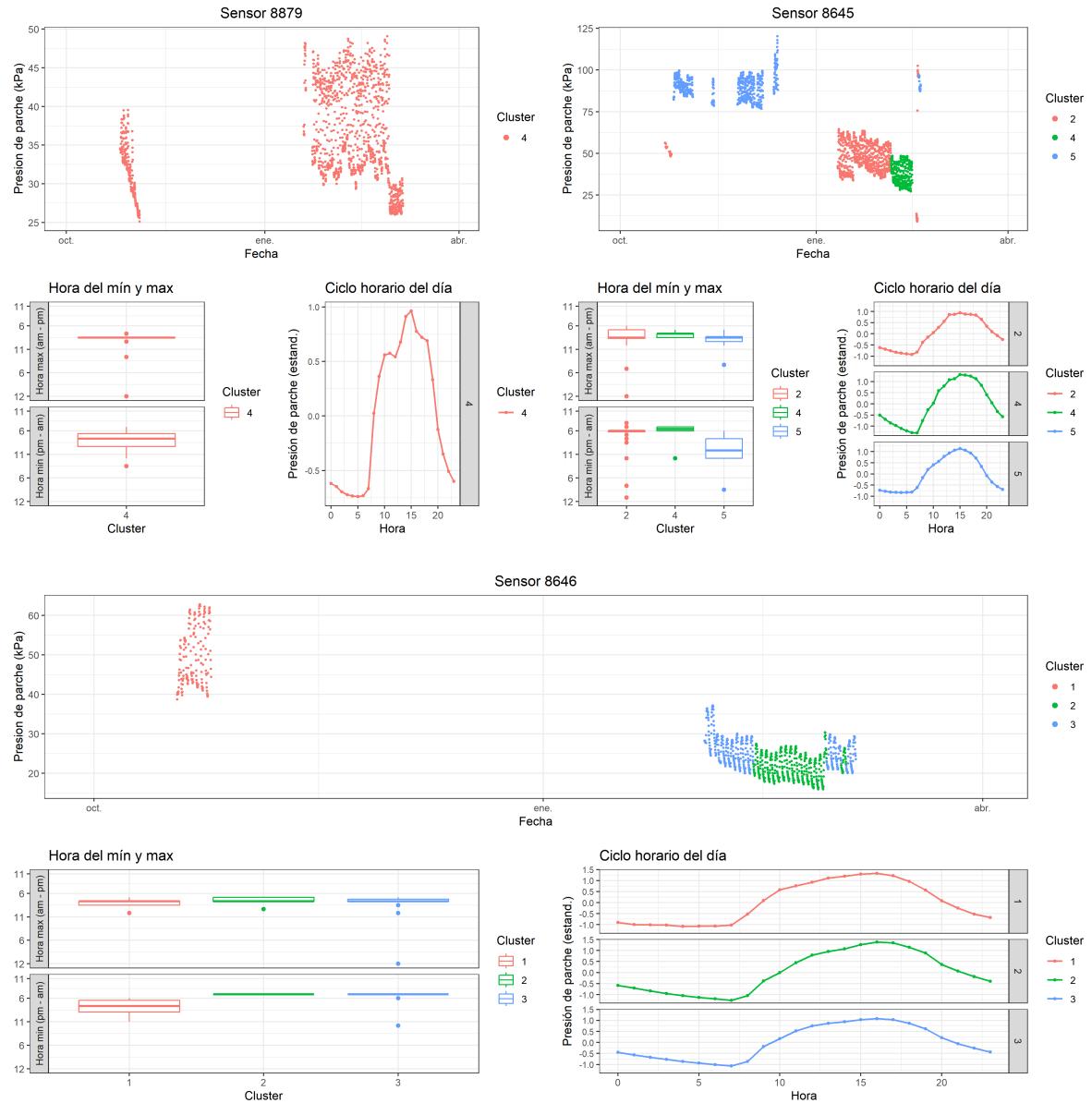
74 T1 (2022-2023)

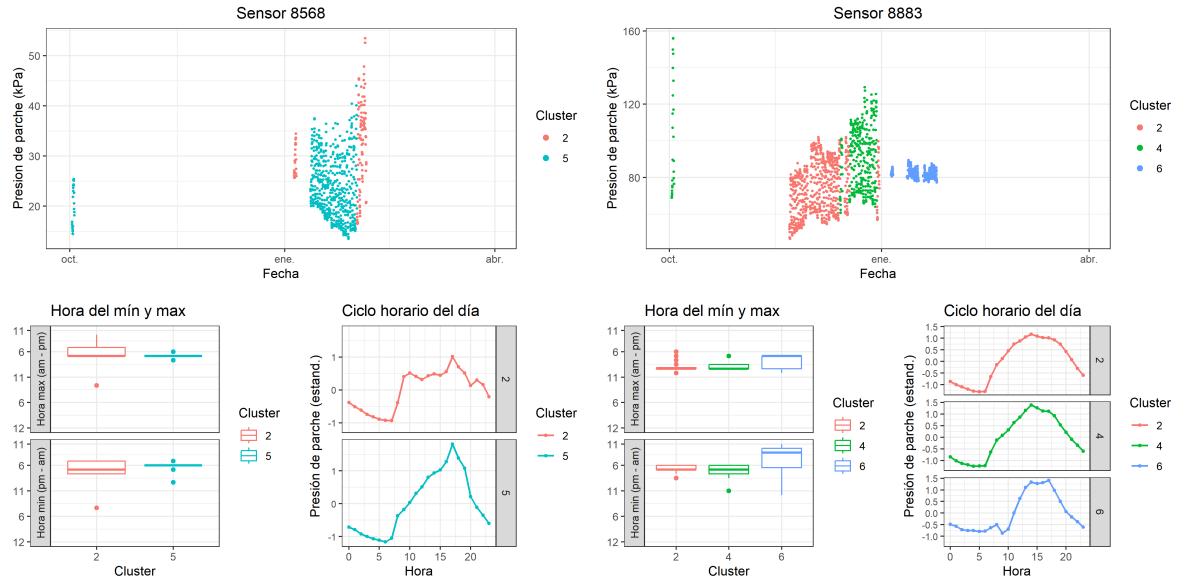




Unidad 3

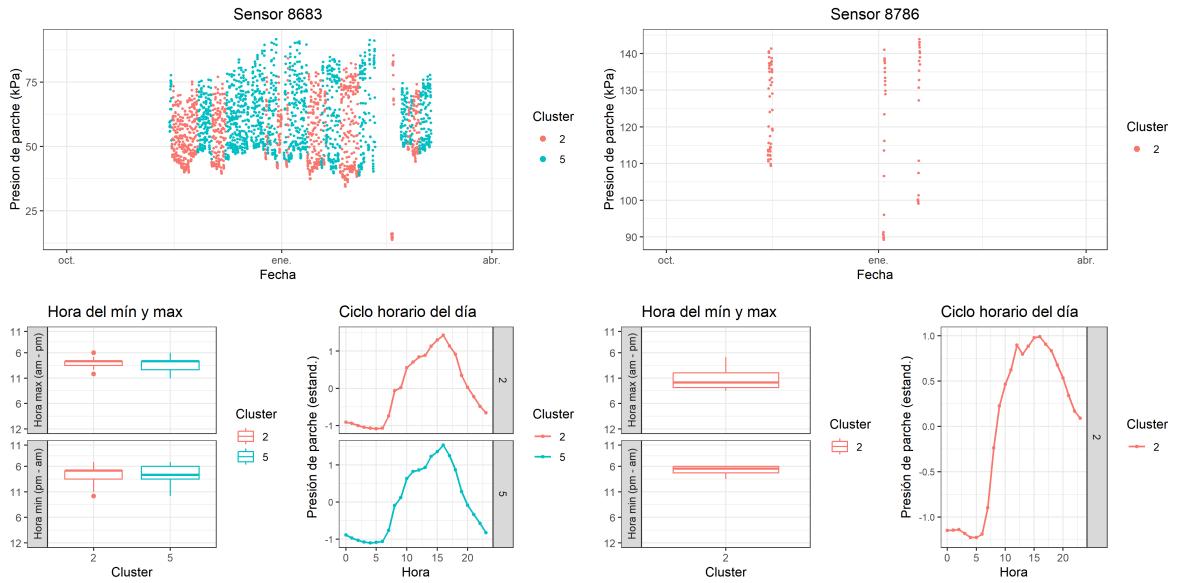
75 T2 (2022-2023)



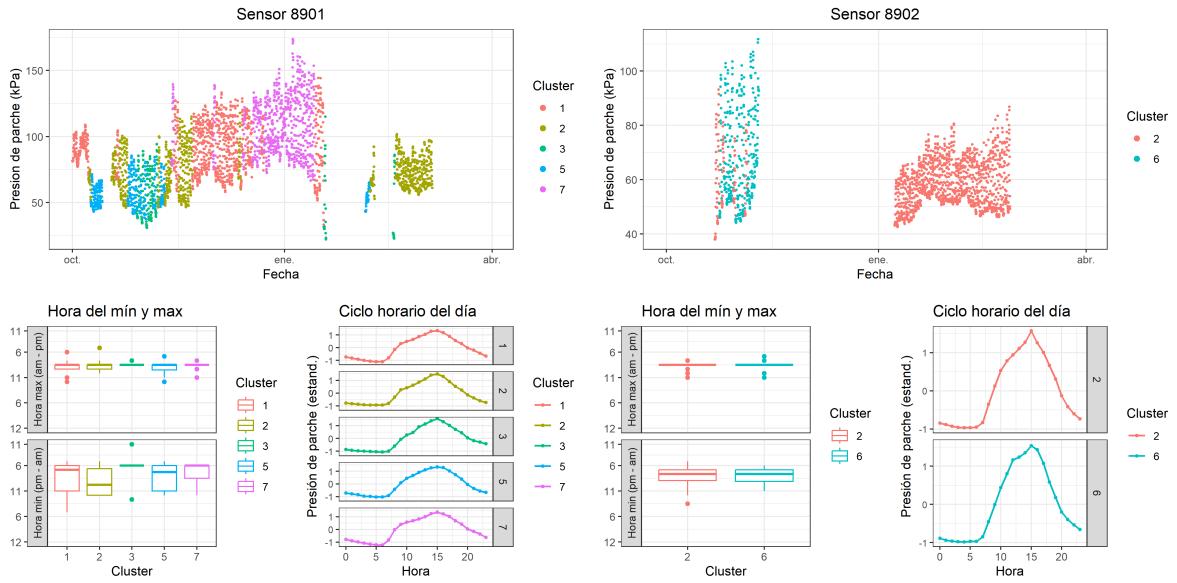


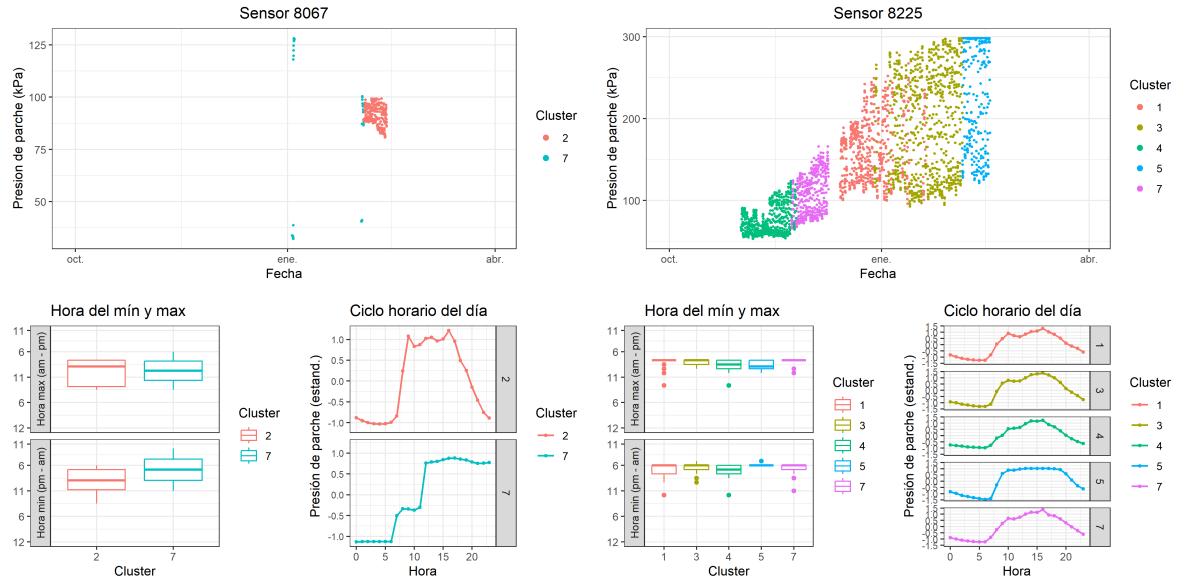
Unidad 3

76 T3 (2022-2023)



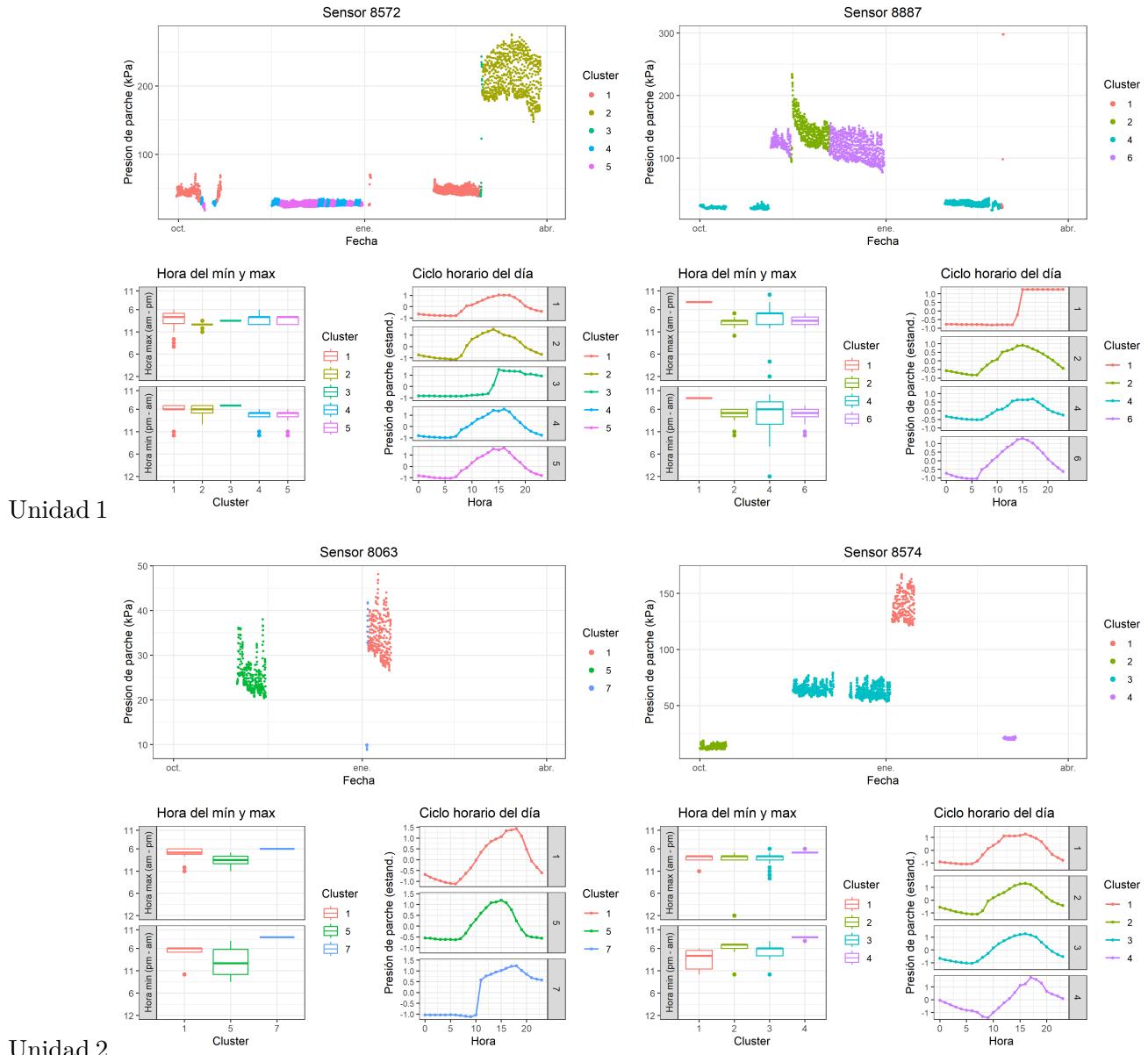
Unidad 1

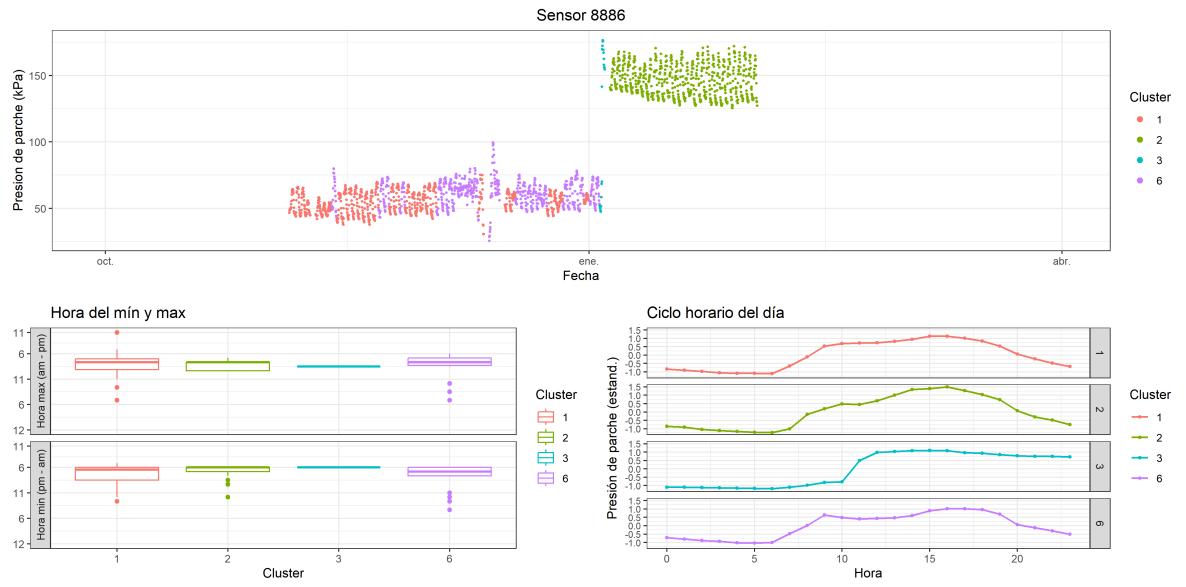




Unidad 3

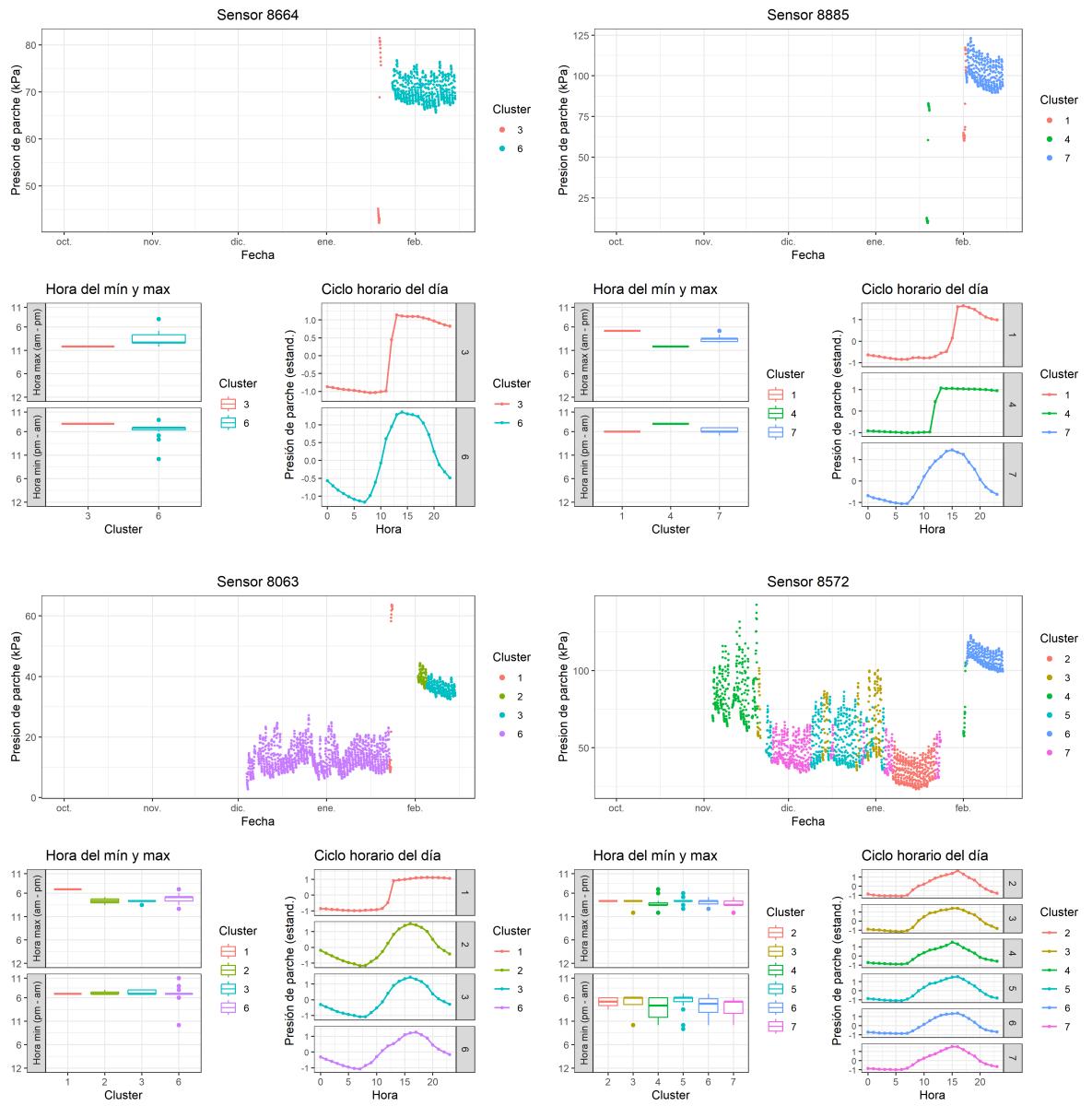
77 T4 (2022-2023)



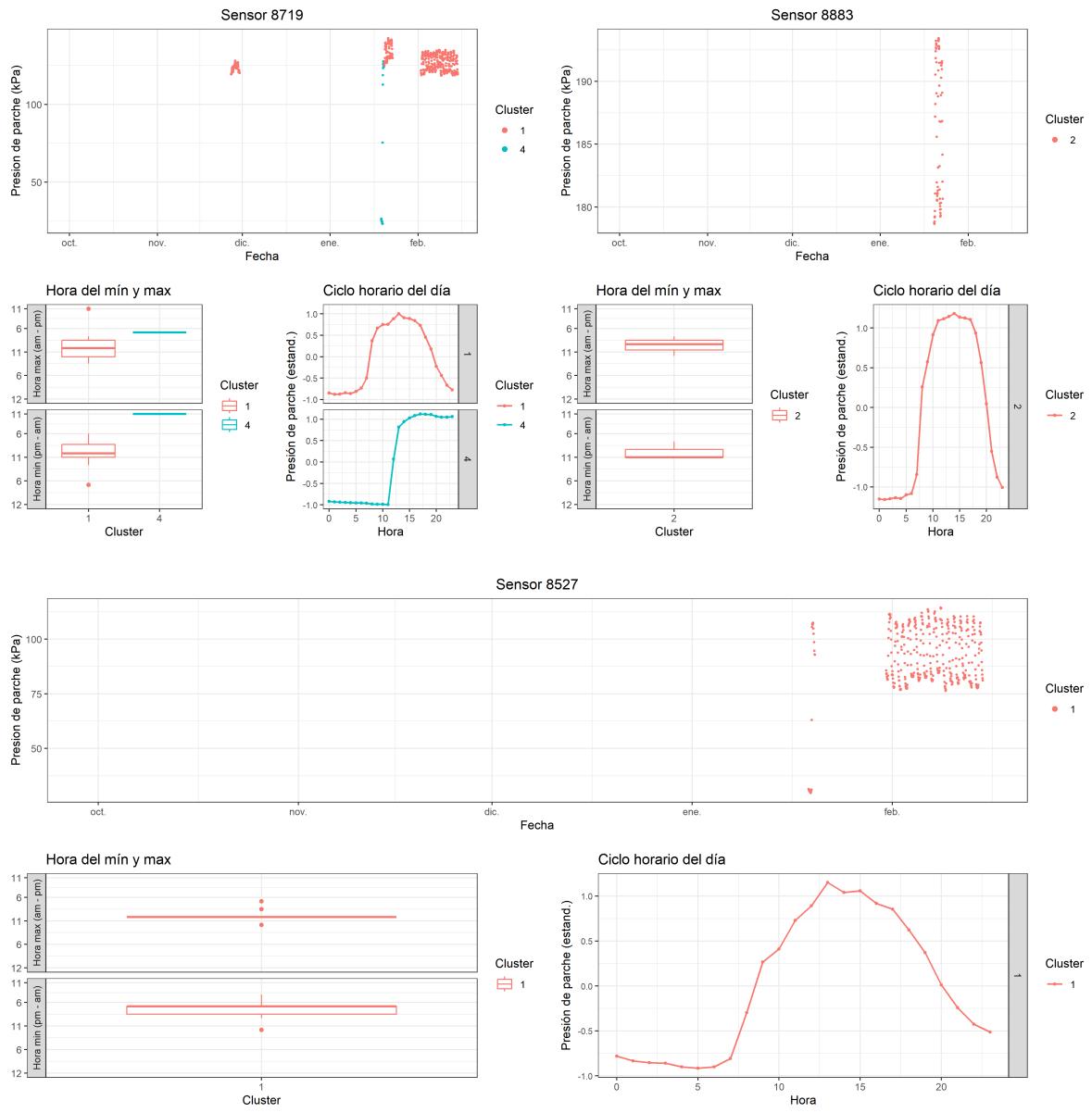


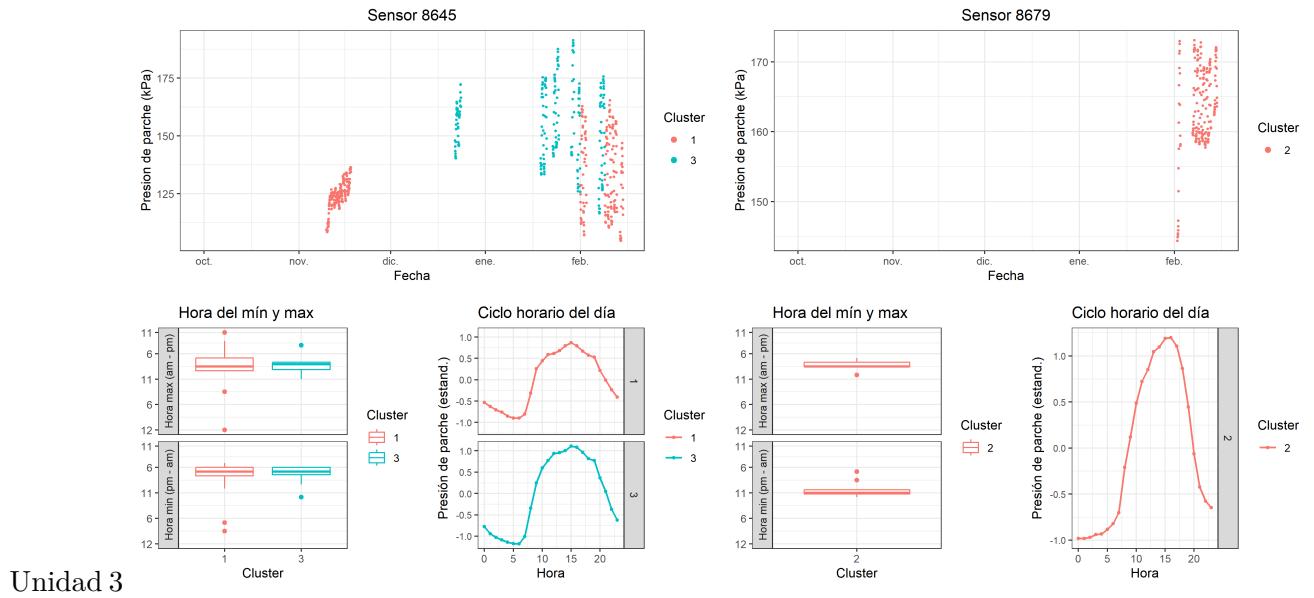
Unidad 3

78 T1 (2023-2024)



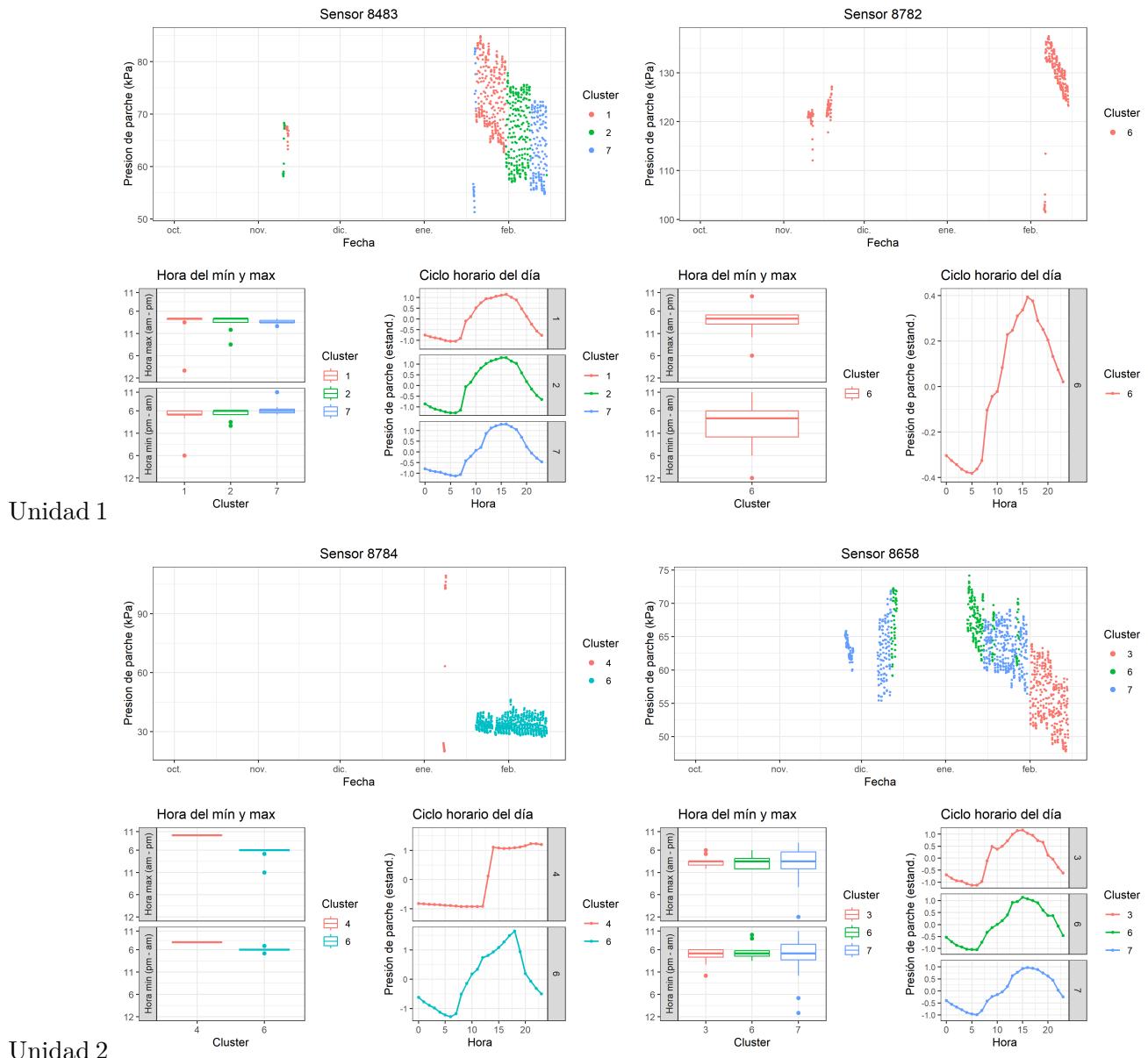
79 T2 (2023-2024)

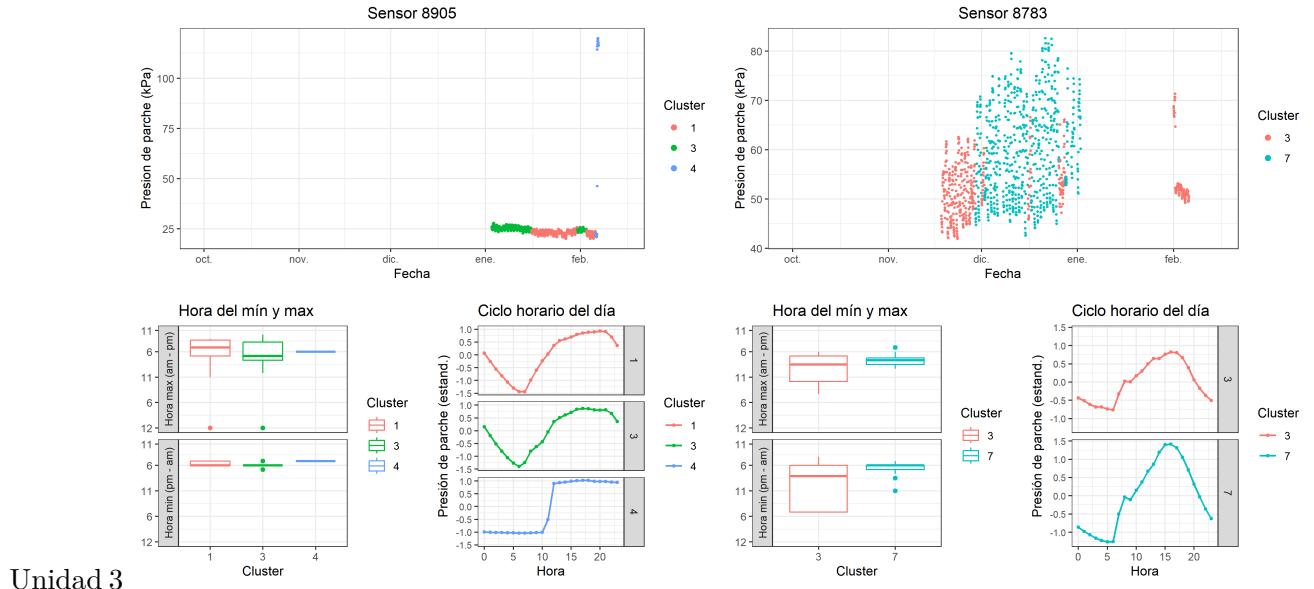




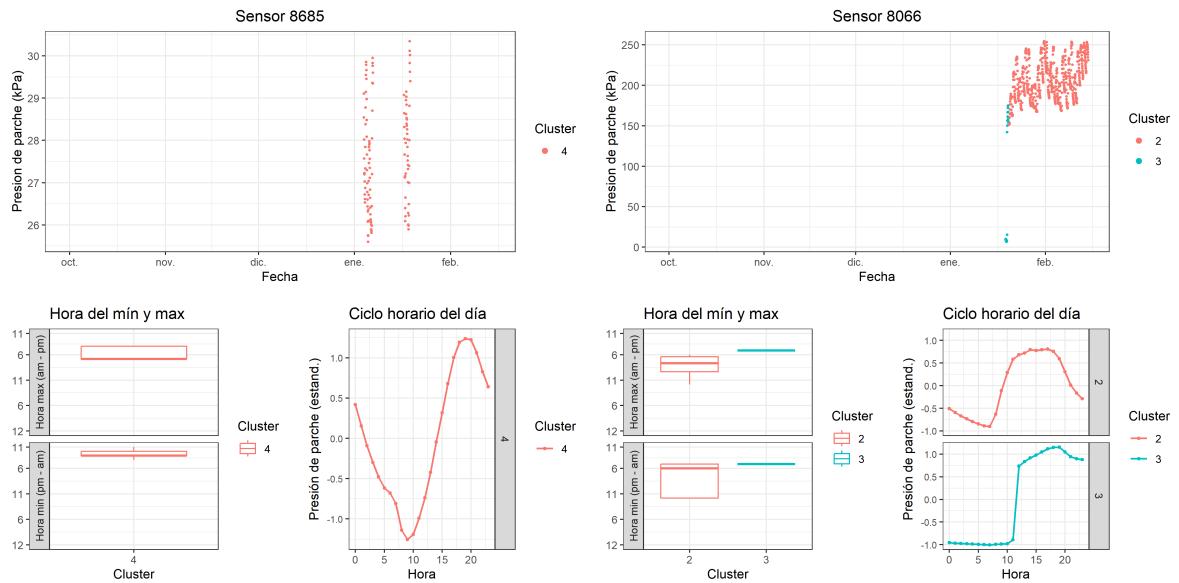
Unidad 3

80 T3 (2023-2024)

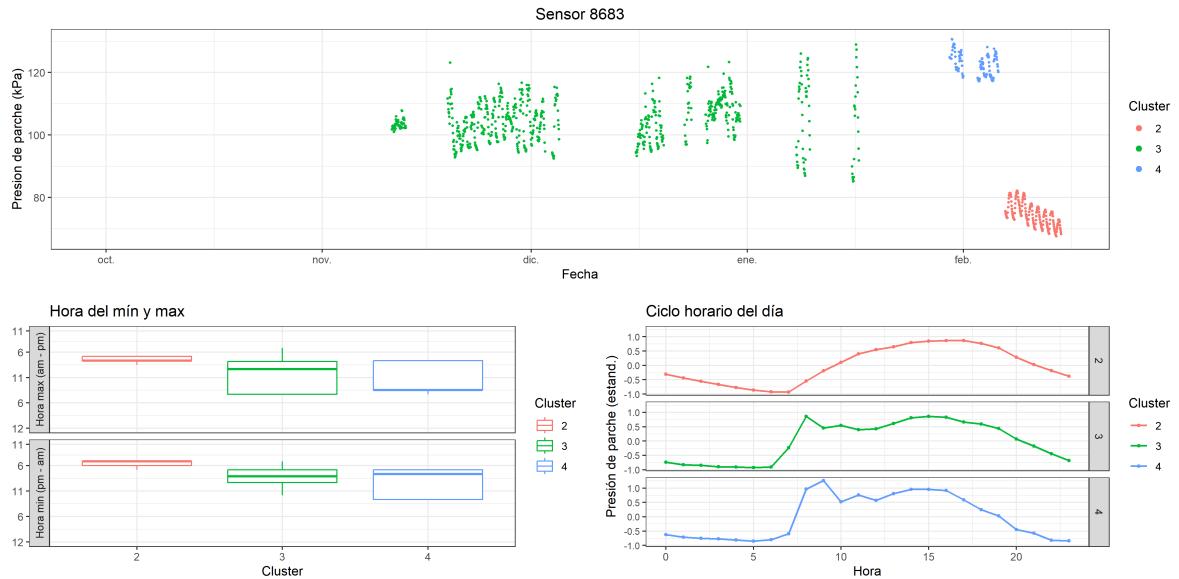




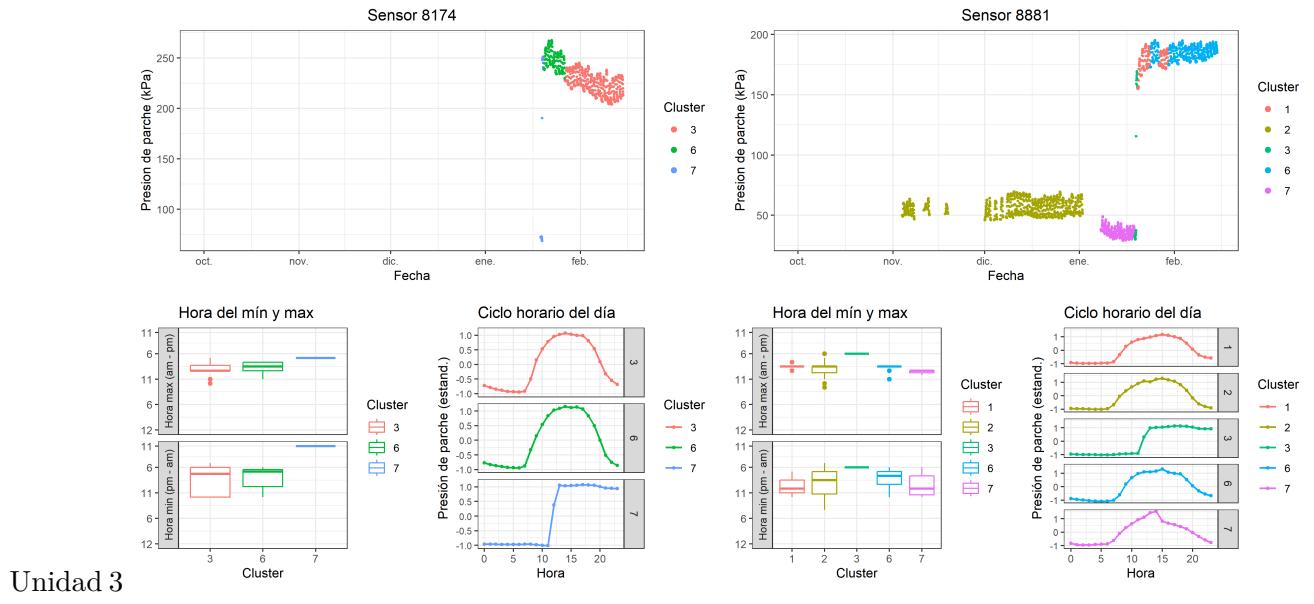
81 T4 (2023-2024)



Unidad 1



Unidad 2

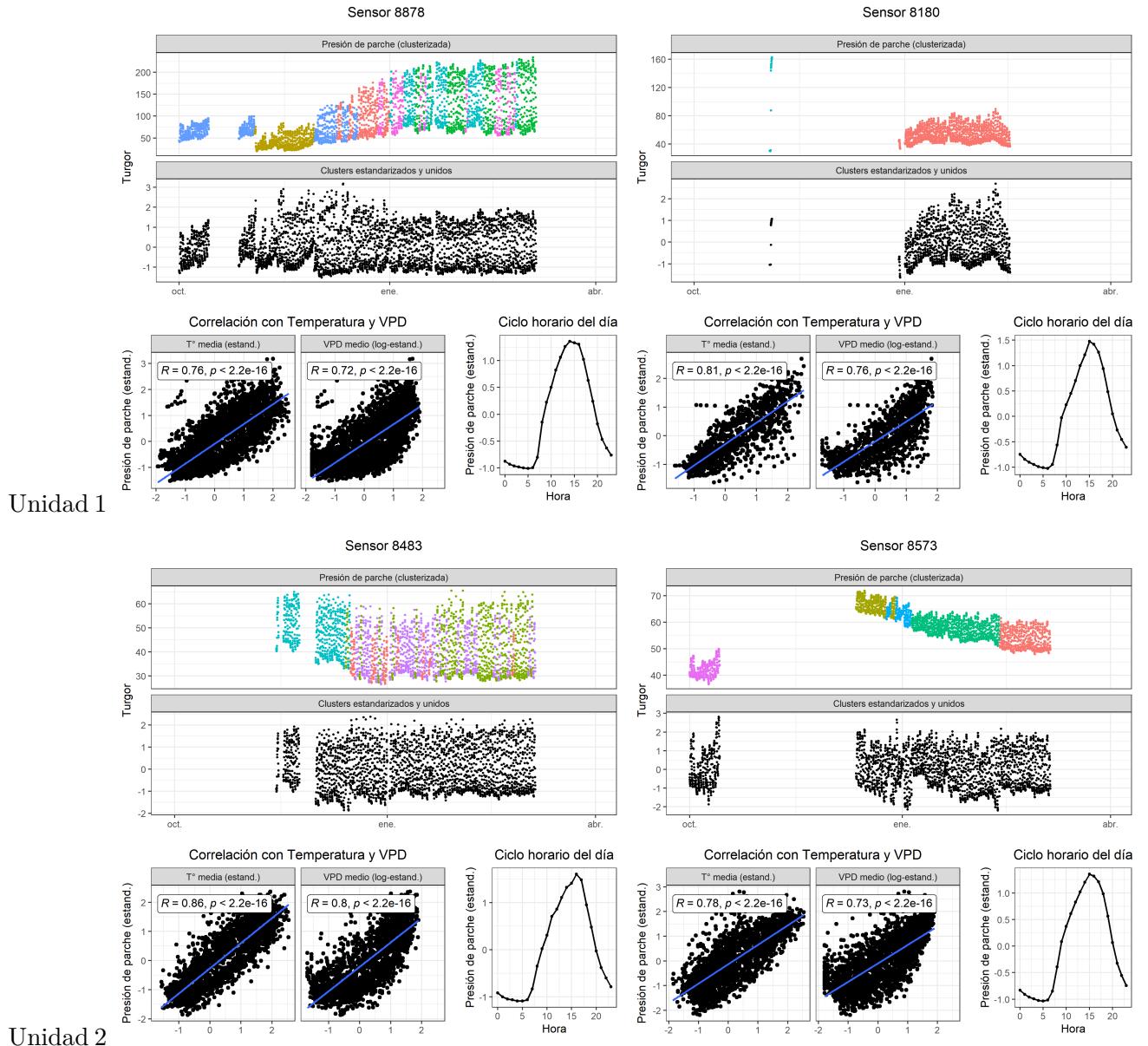


82 Estandarización de clusters

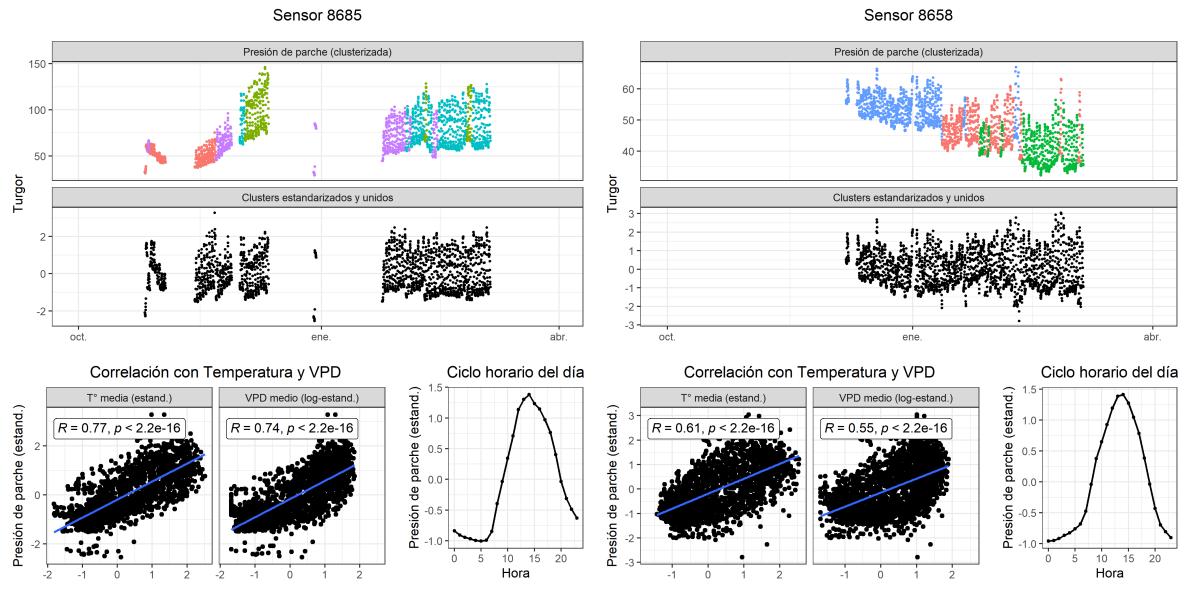
Para generar series únicas continuas por sensor (i.e. disminuir las discordancias entre periodos de recalibración de los sensores), se realizó una estandarización de cada cluster, lo cual significó una unificación las series temporales de estos a nivel de sensor. A continuación se muestran dichas series resultantes, además de su correlación con temperatura y VPD, y el ciclo horario del día.

82.1 La Esperanza

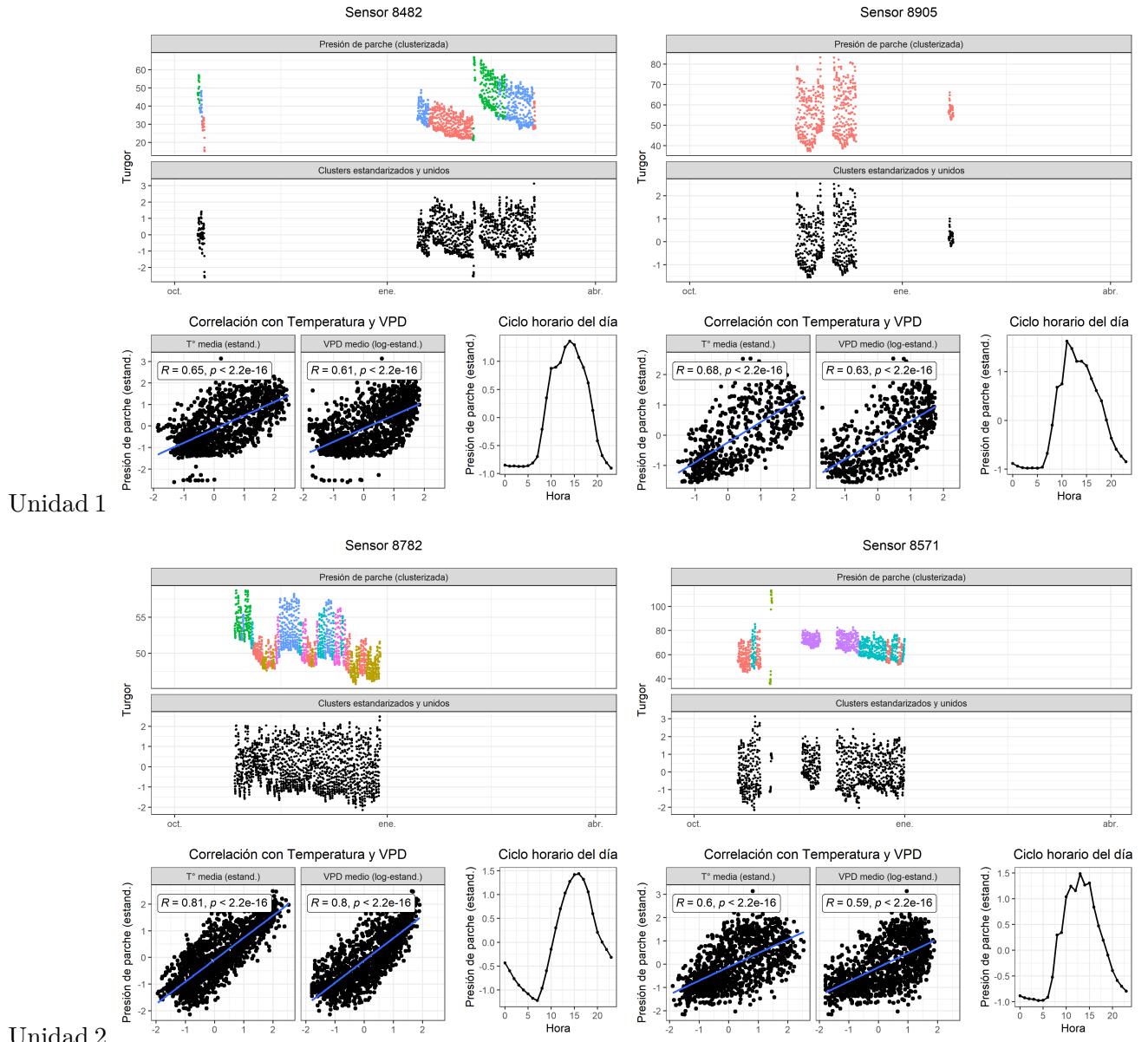
83 T1 (2022-2023)



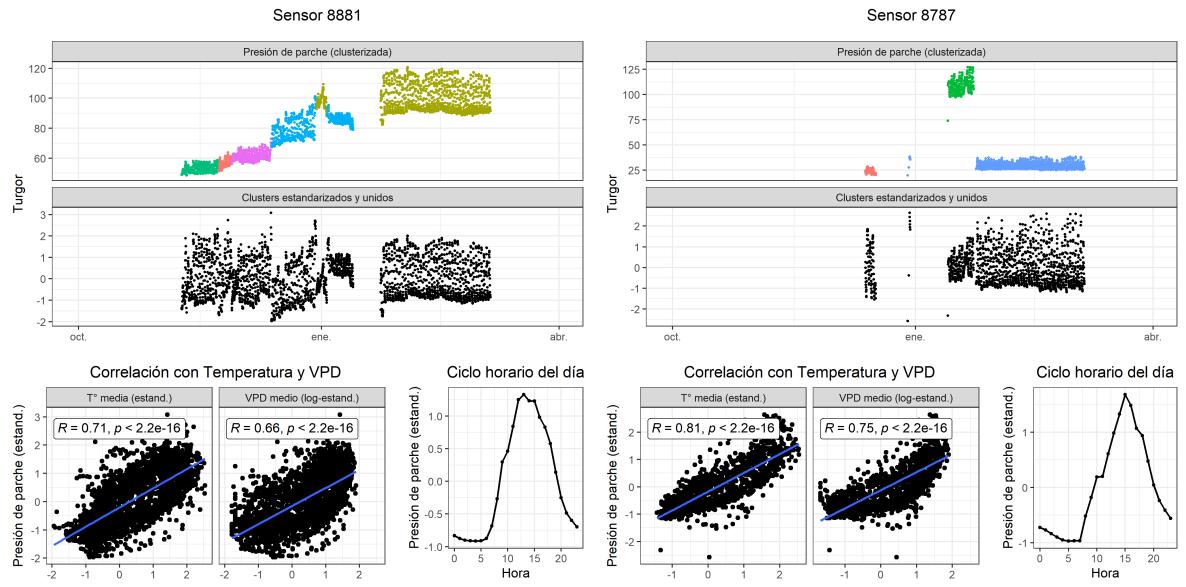
Unidad 3



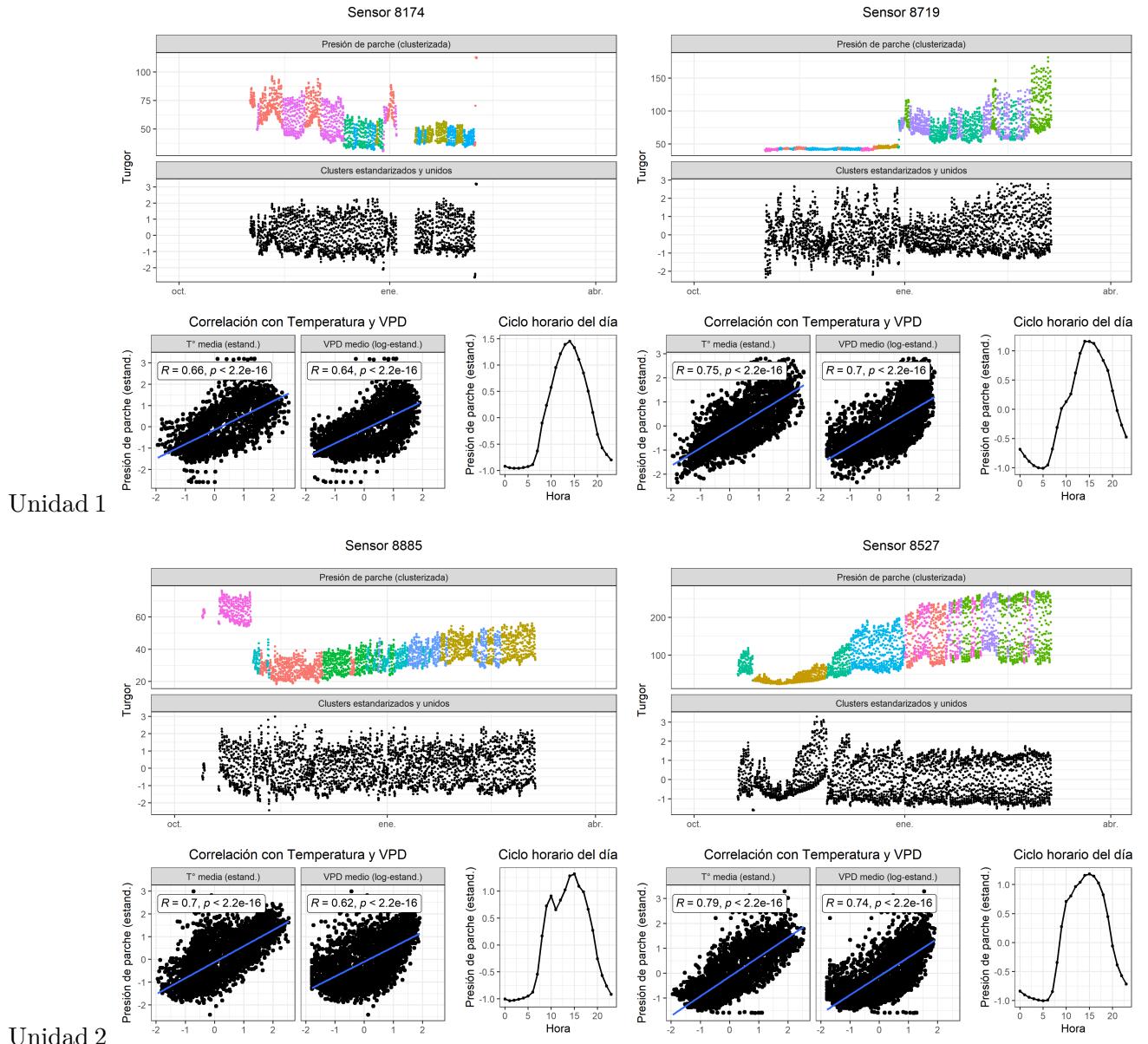
84 T2 (2022-2023)

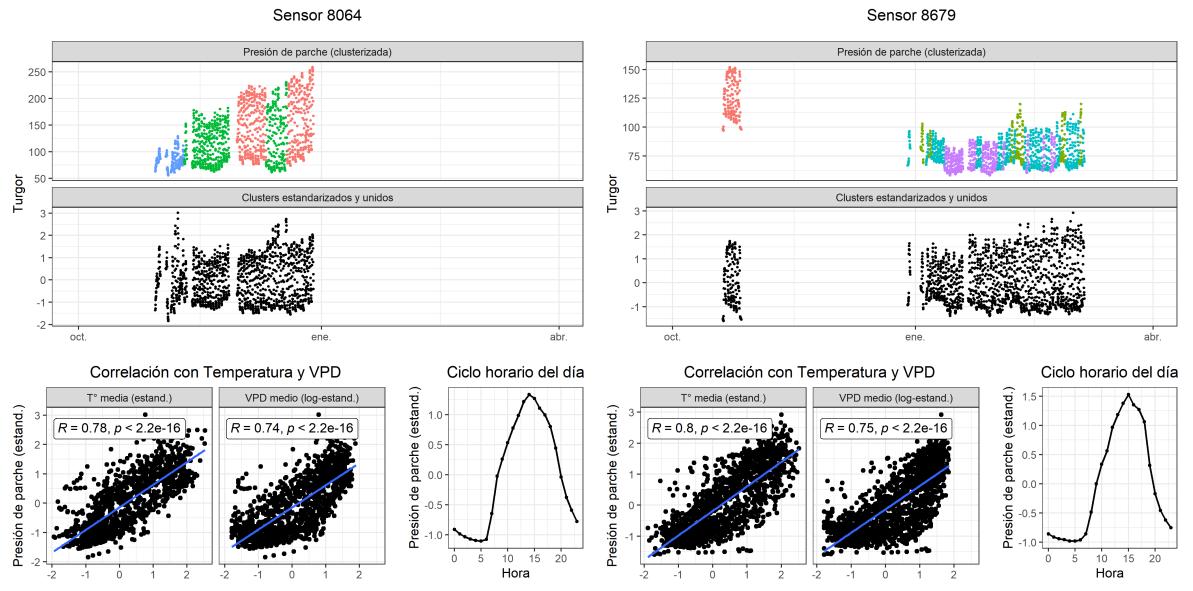


Unidad 3



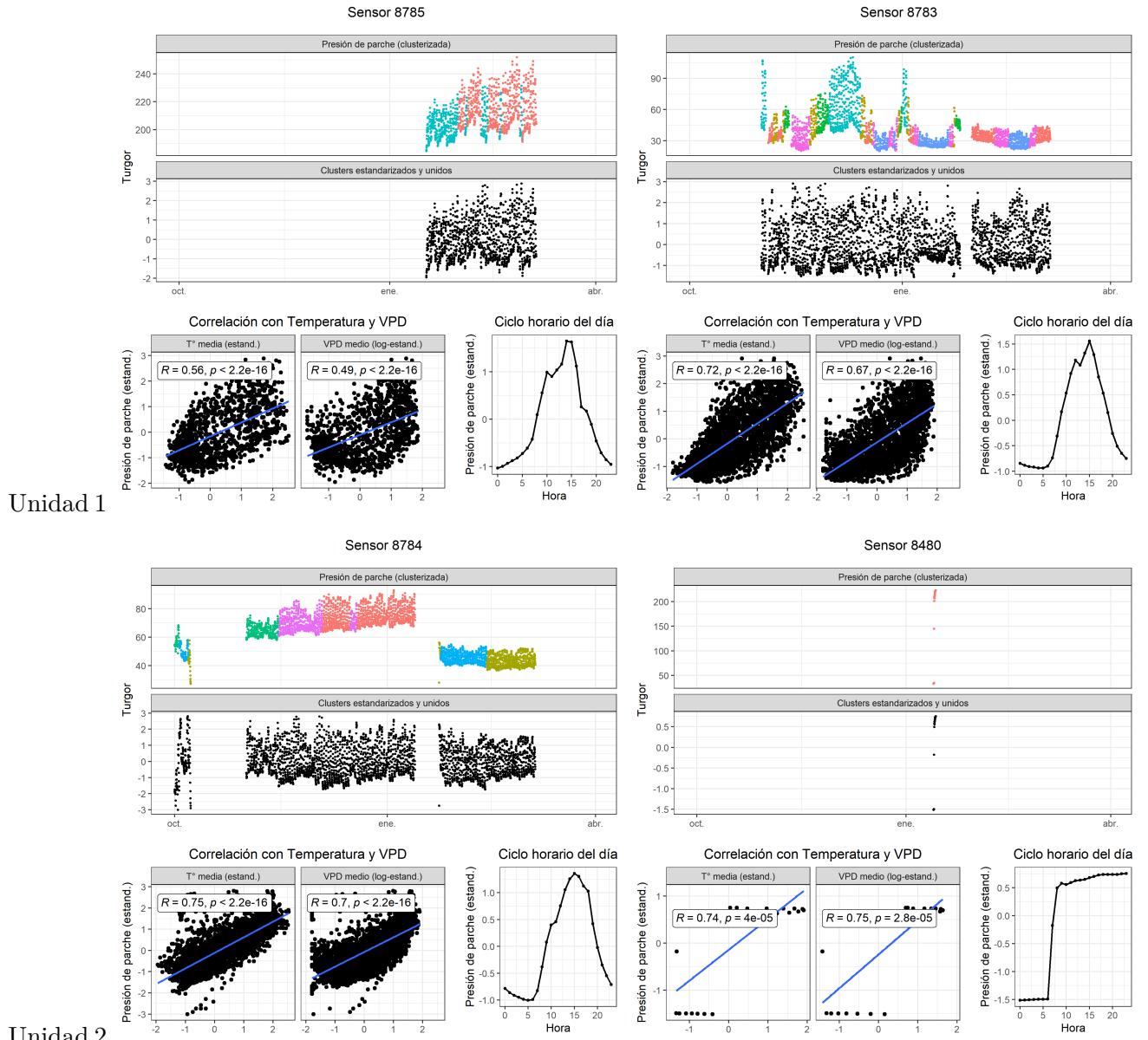
85 T3 (2022-2023)

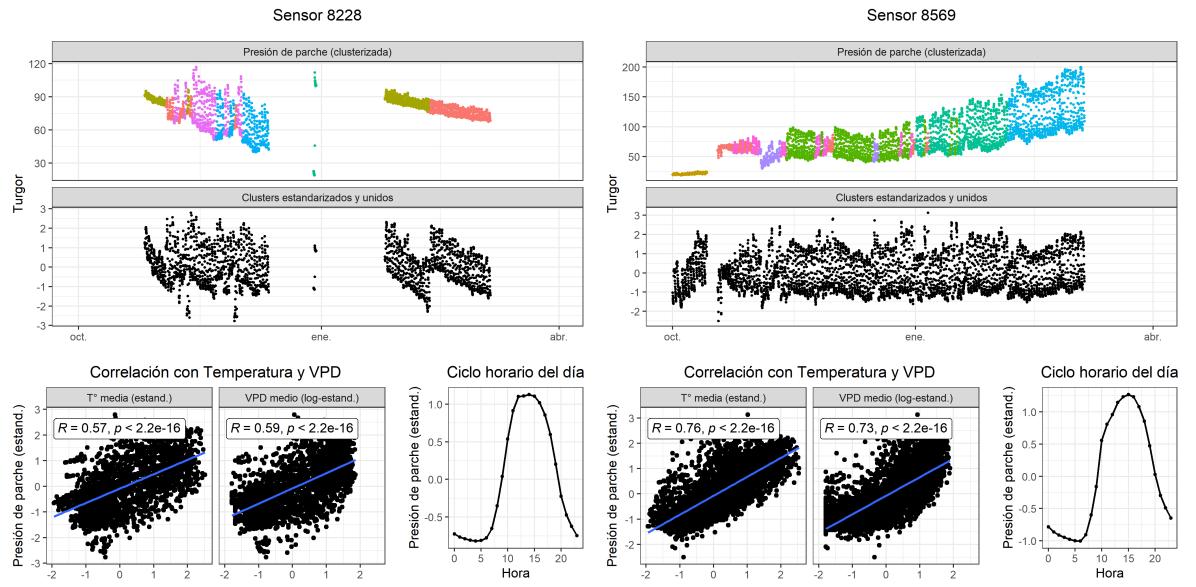




Unidad 3

86 T4 (2022-2023)

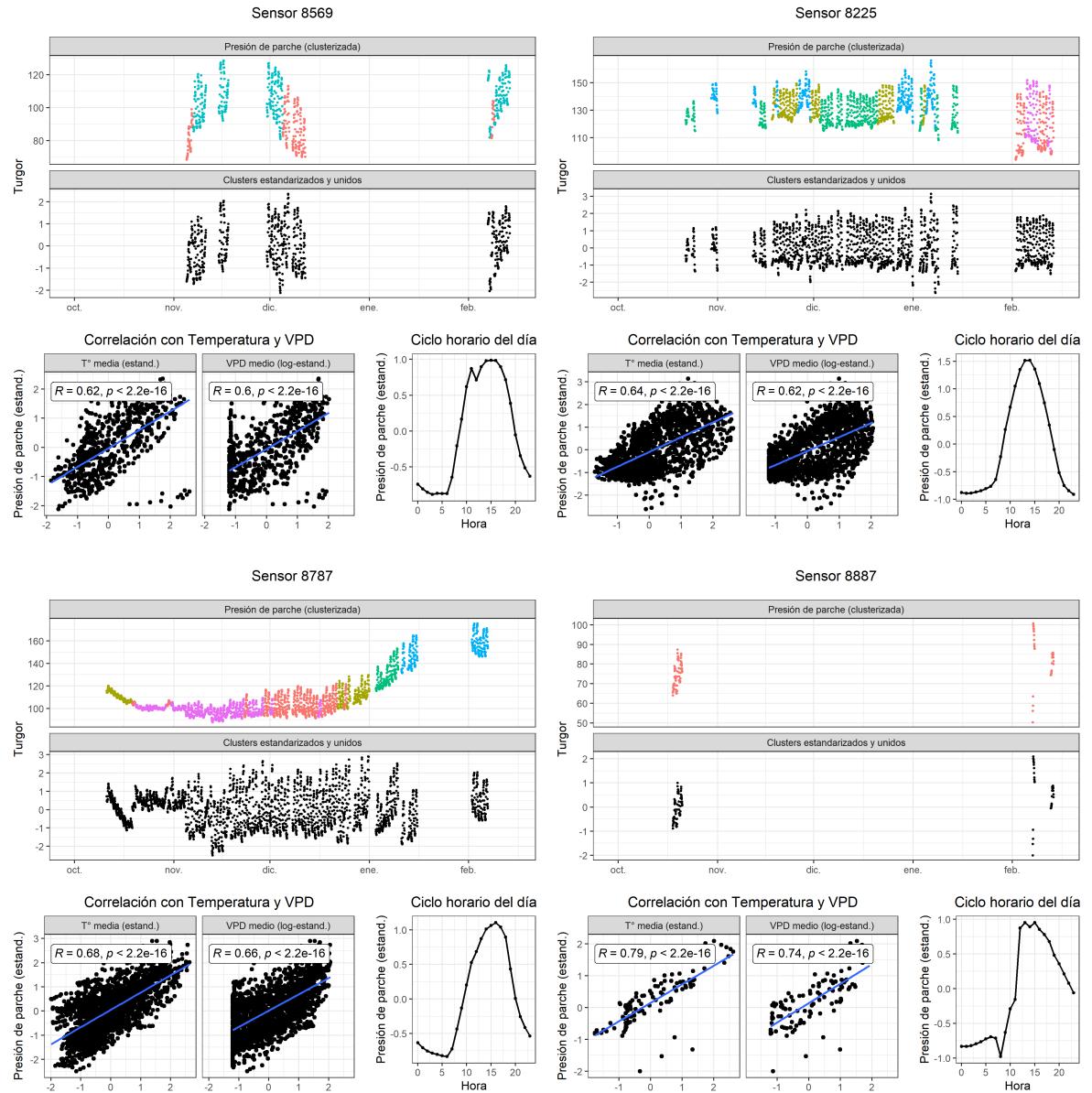


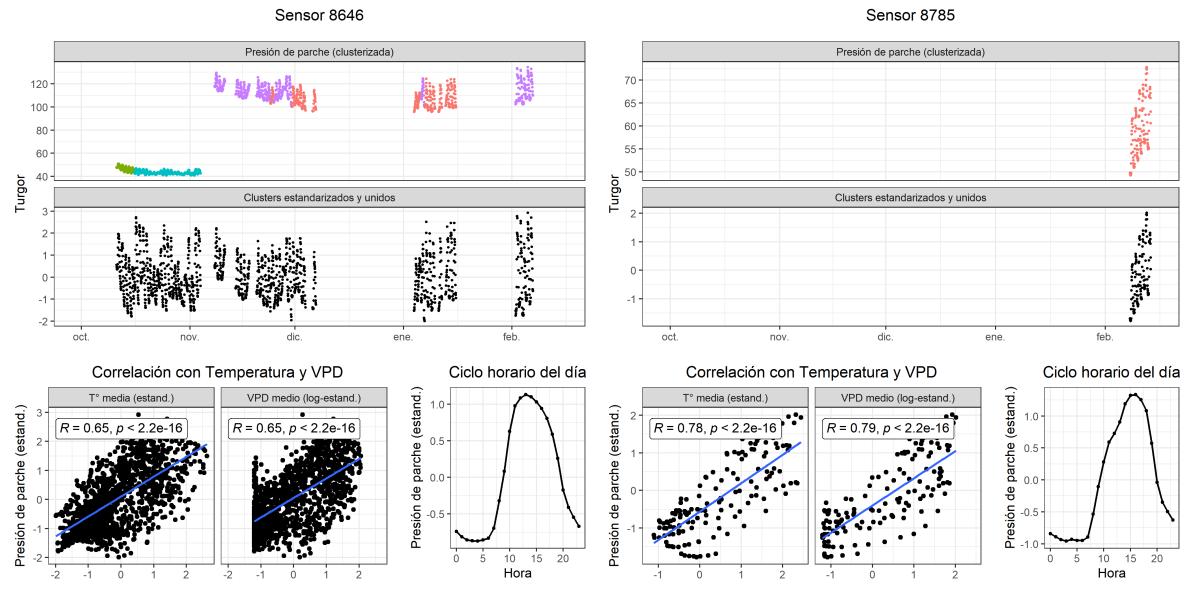


Unidad 3

87 T1 (2023-2024)

Unidad 1

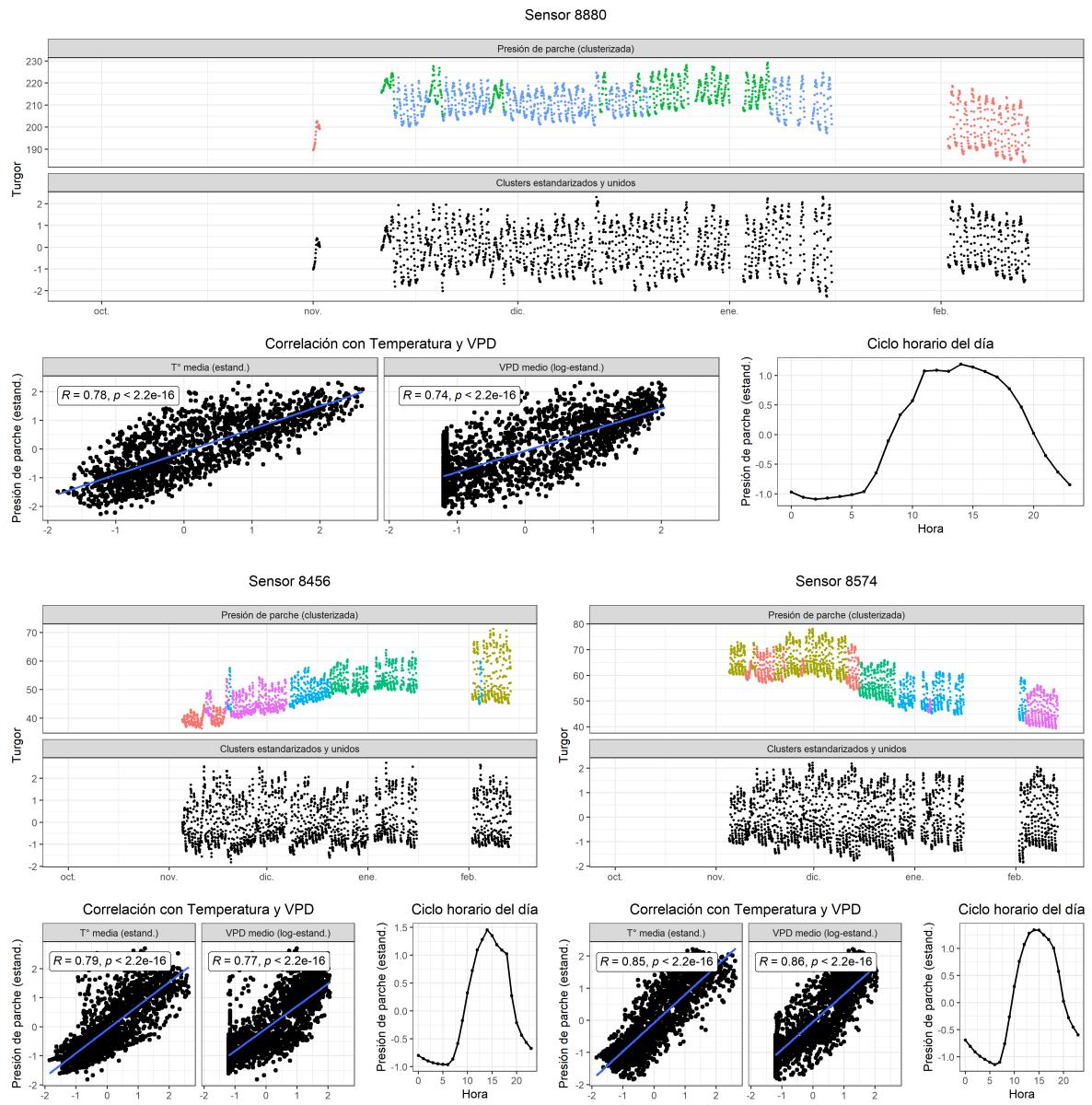




Unidad 3

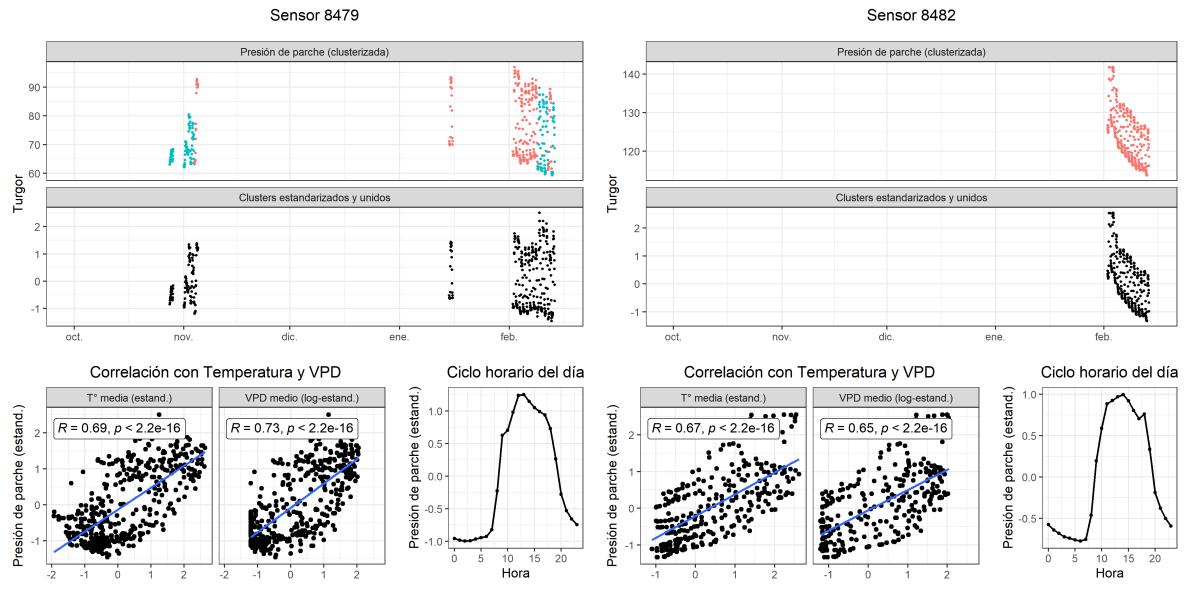
88 T2 (2023-2024)

Unidad 1

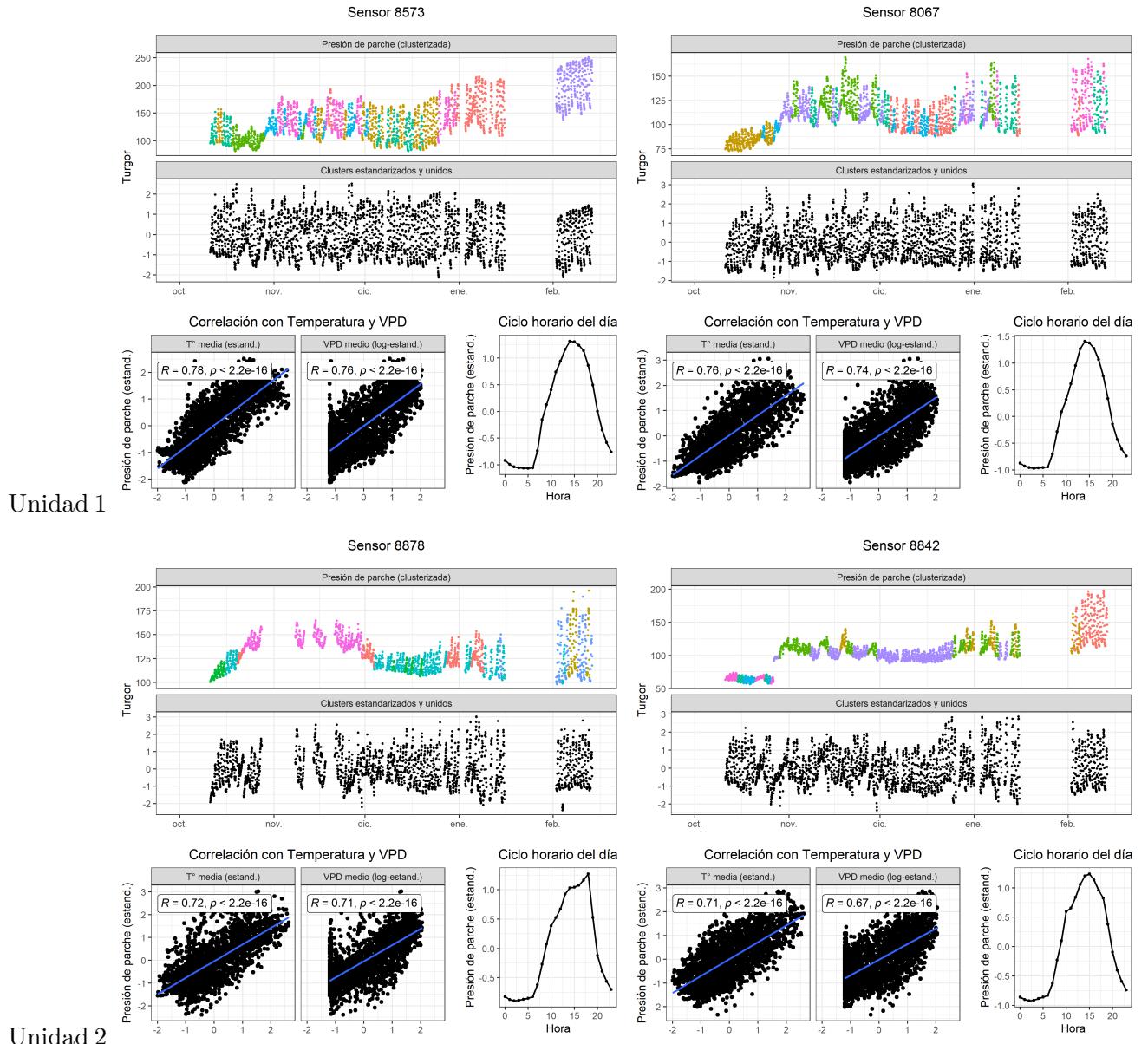


Unidad 2

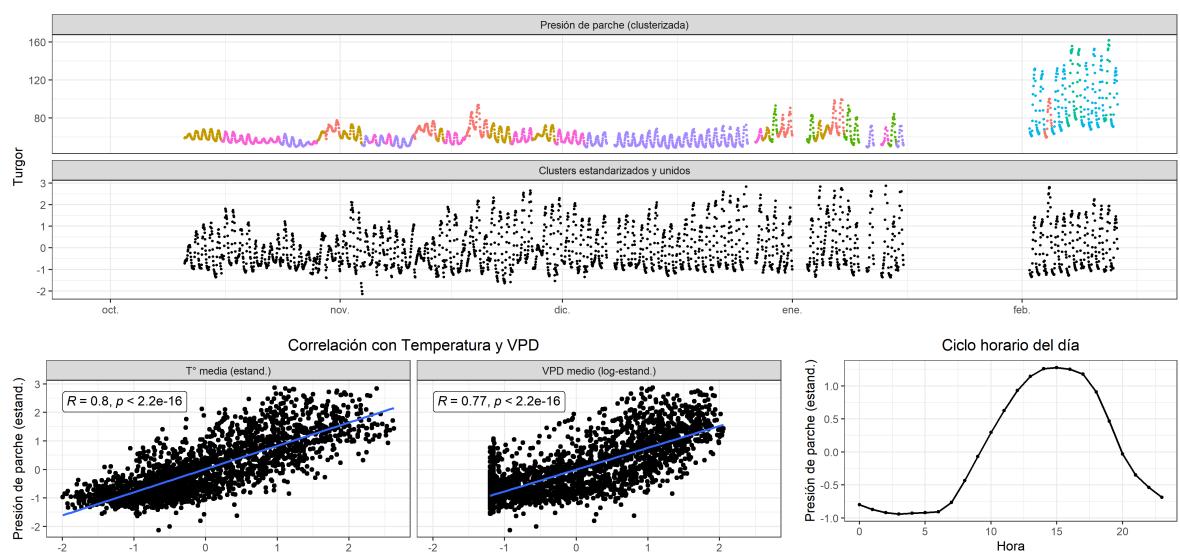
Unidad 3



89 T3 (2023-2024)



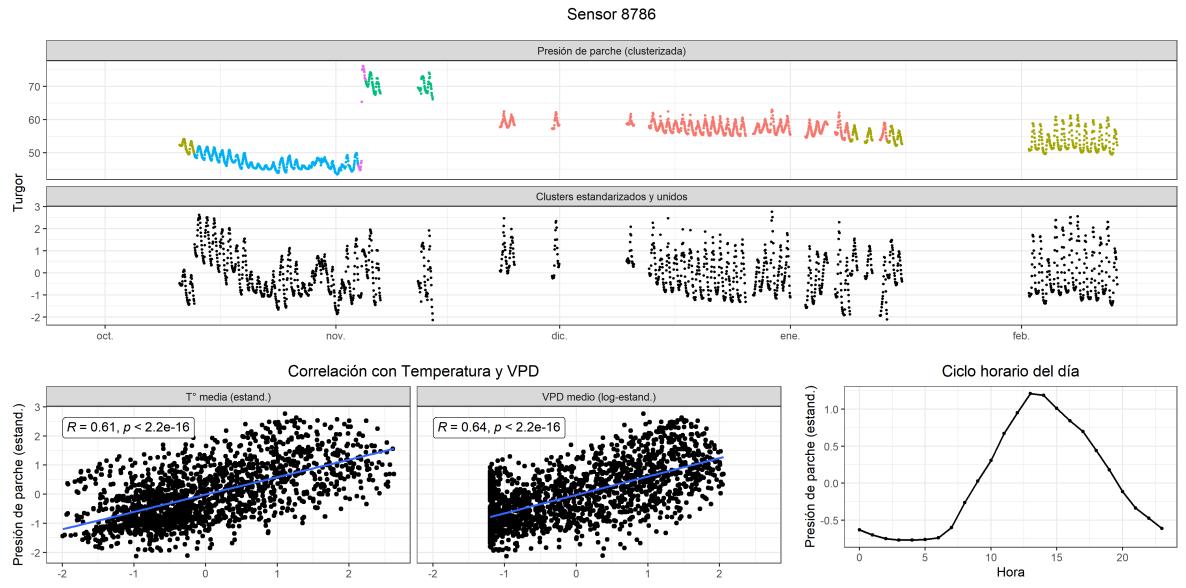
Sensor 8694



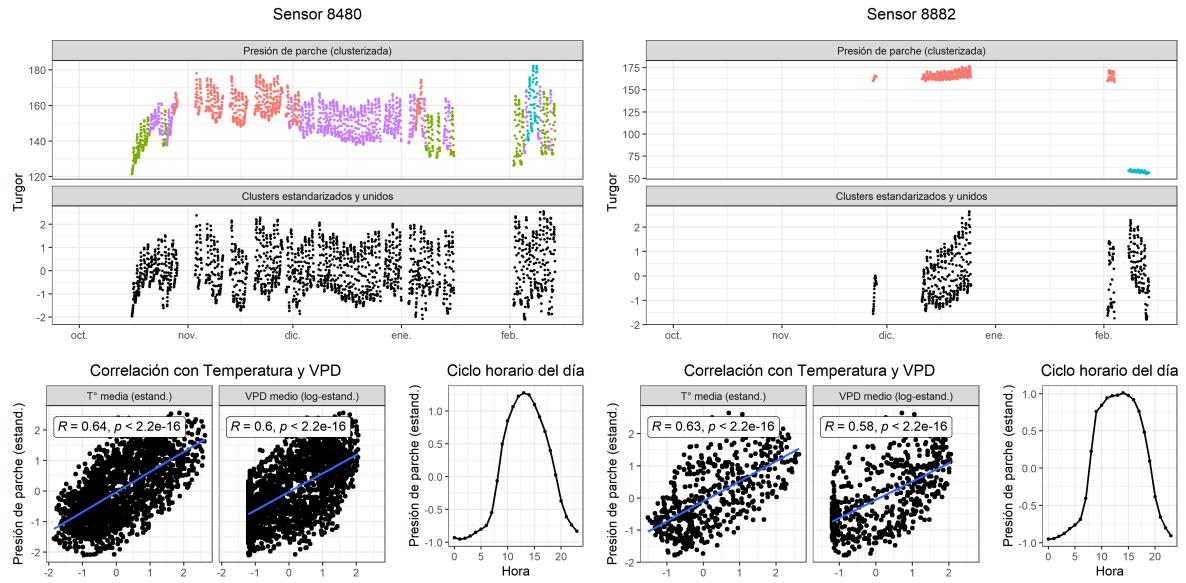
Unidad 3

90 T4 (2023-2024)

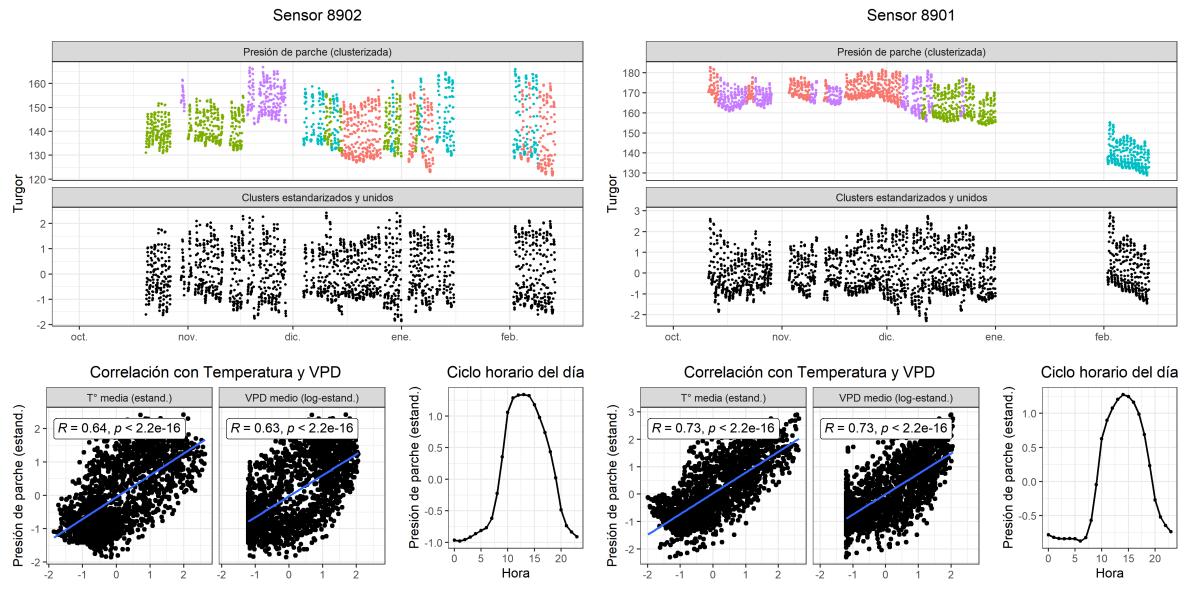
Unidad 1



Unidad 2



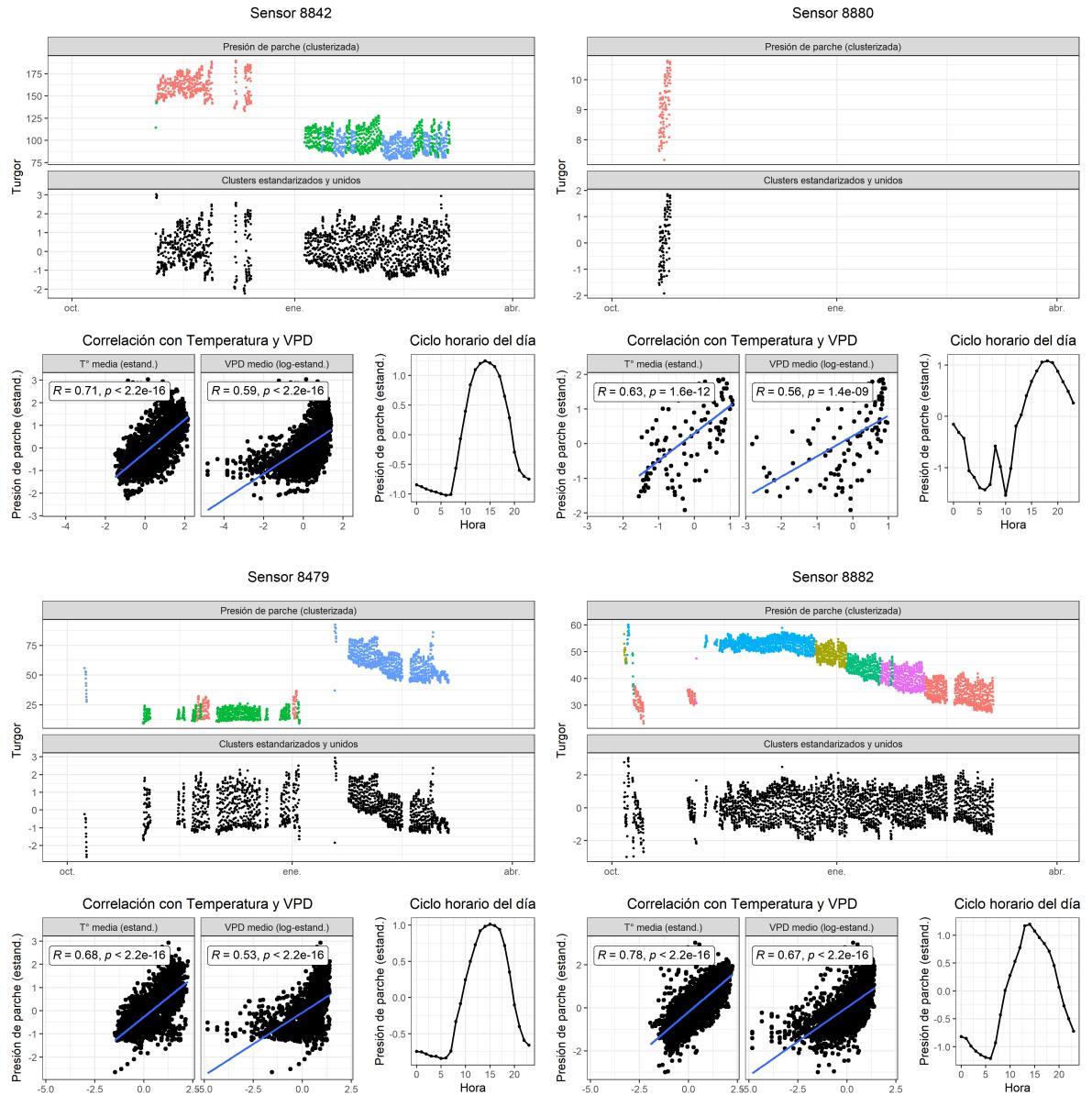
Unidad 3



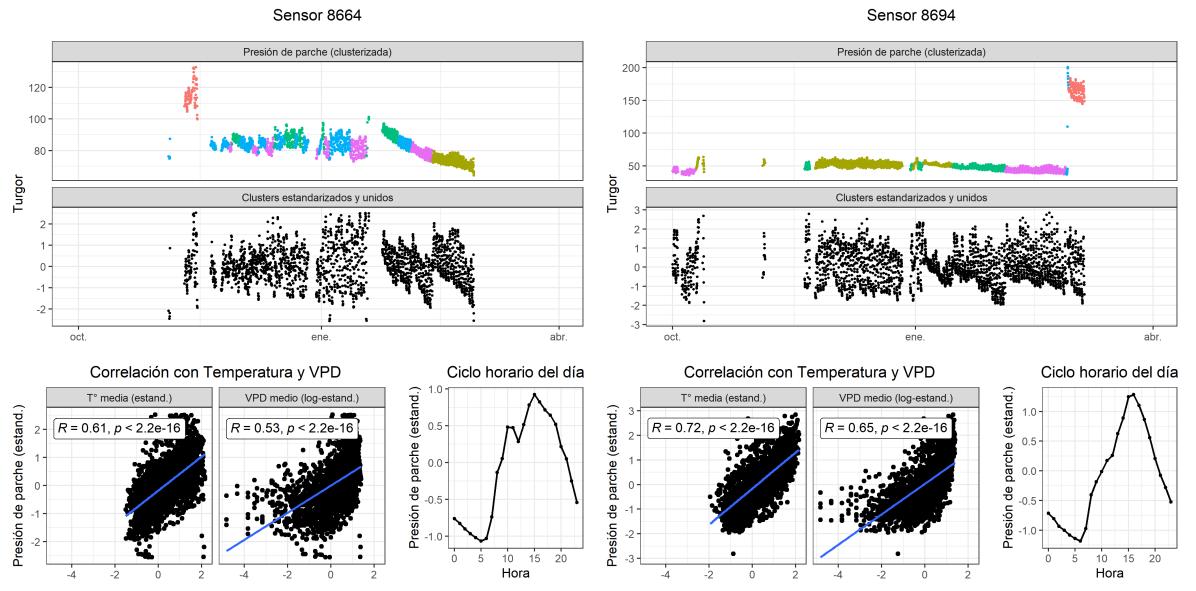
90.1 Rio Claro

91 T1 (2022-2023)

Unidad 1

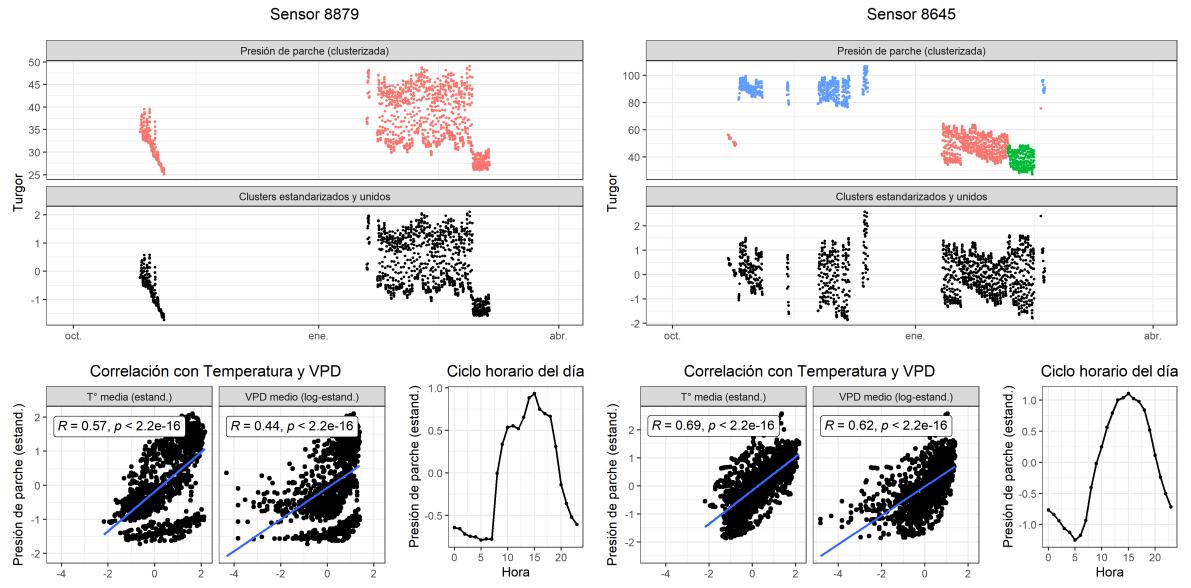


Unidad 3

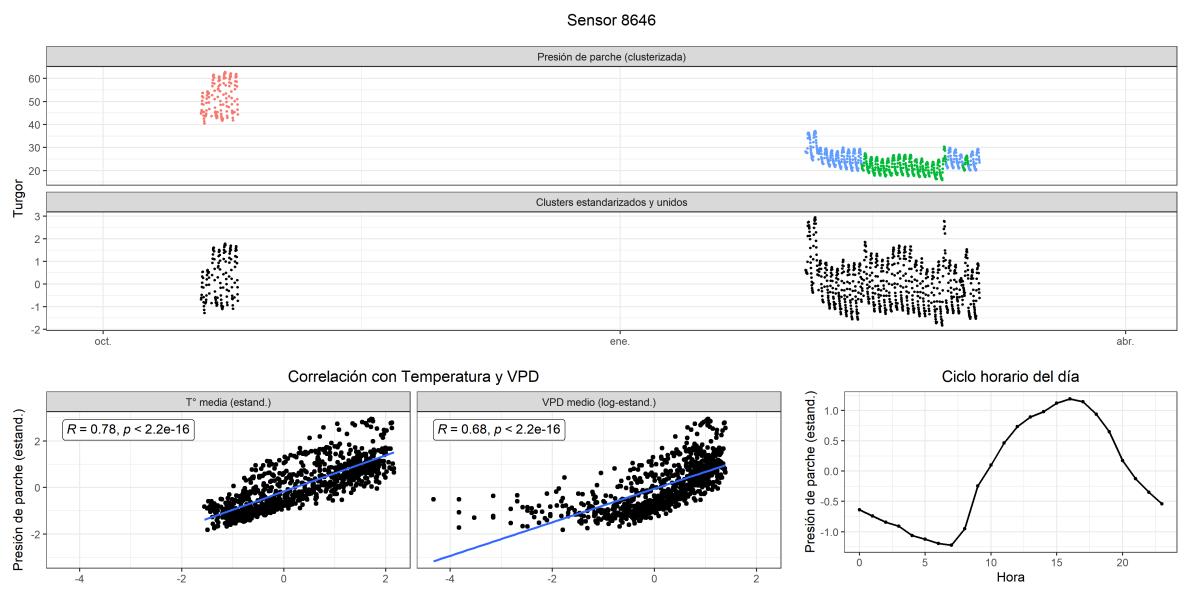


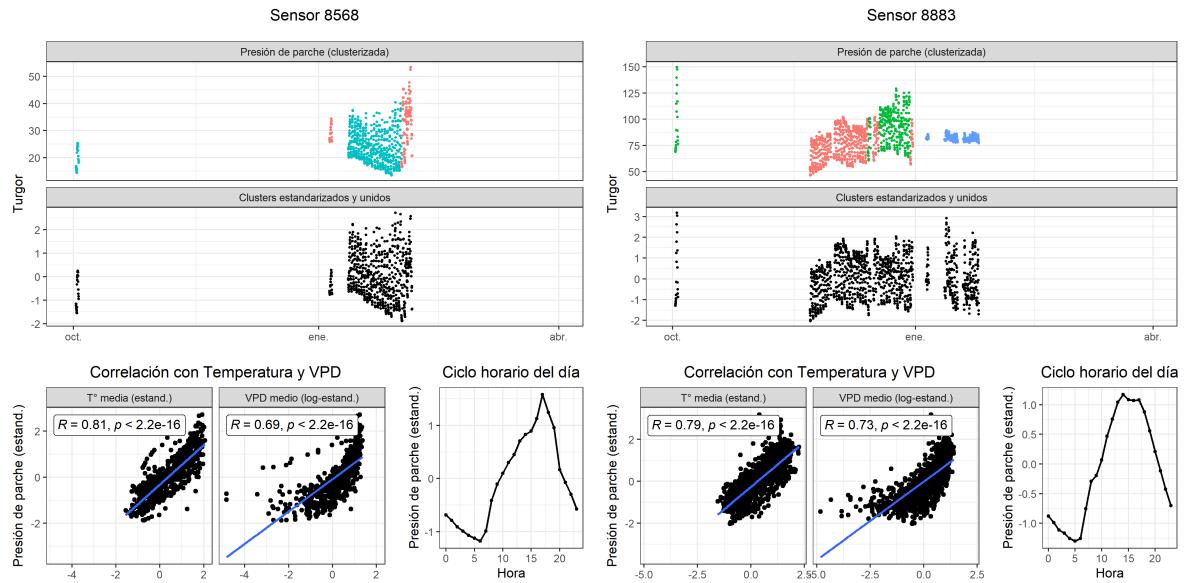
92 T2 (2022-2023)

Unidad 1



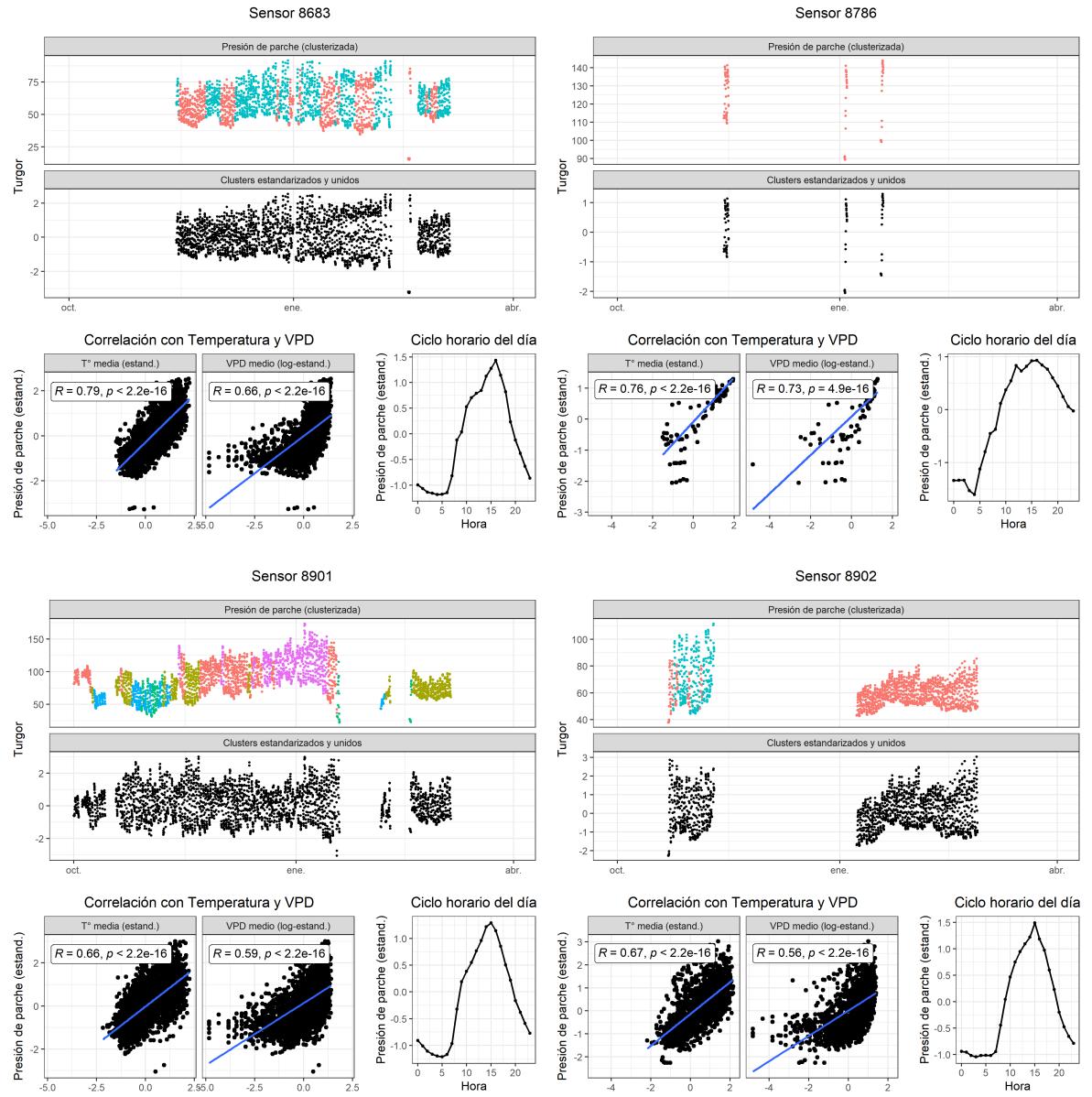
Unidad 2





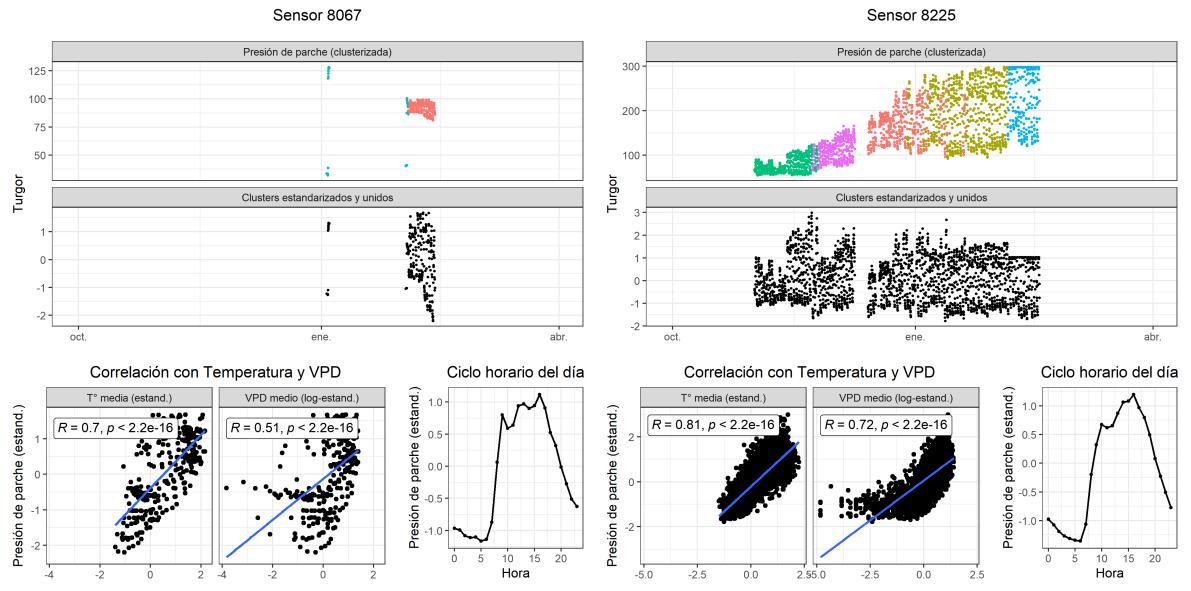
93 T3 (2022-2023)

Unidad 1

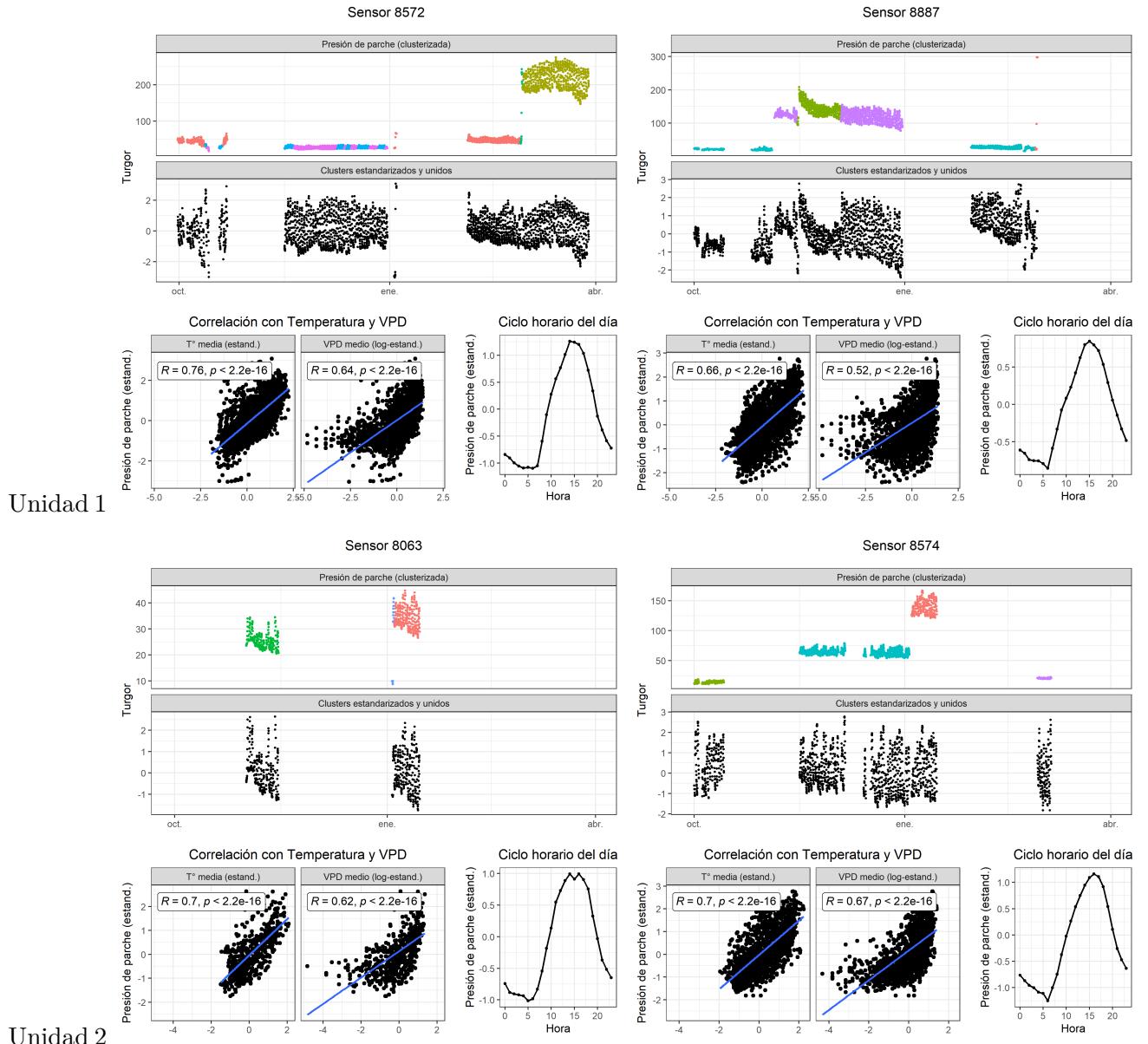


Unidad 2

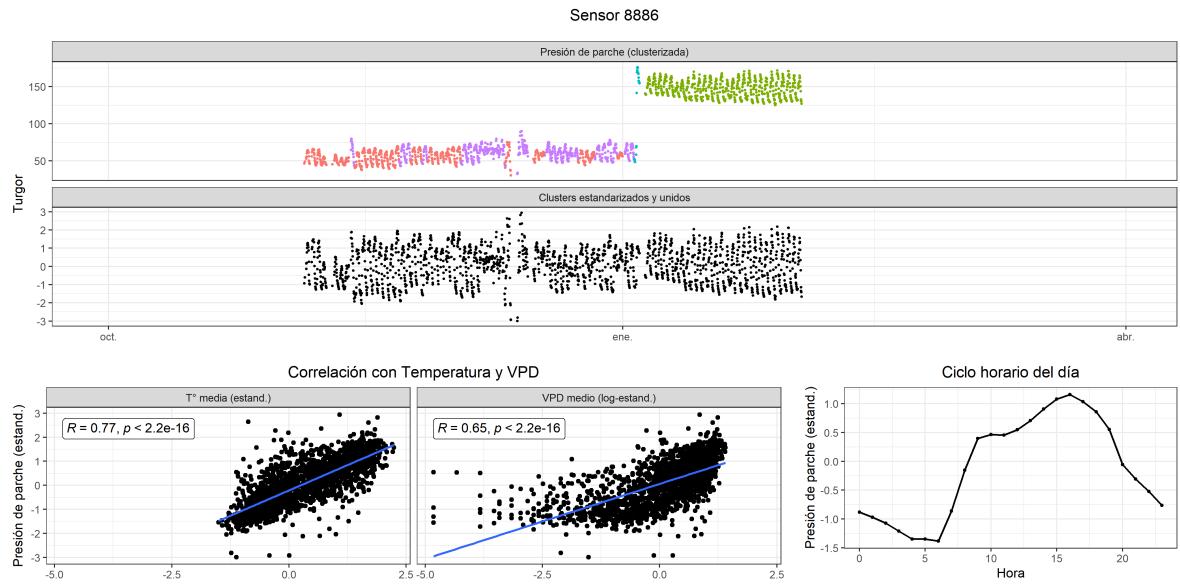
Unidad 3



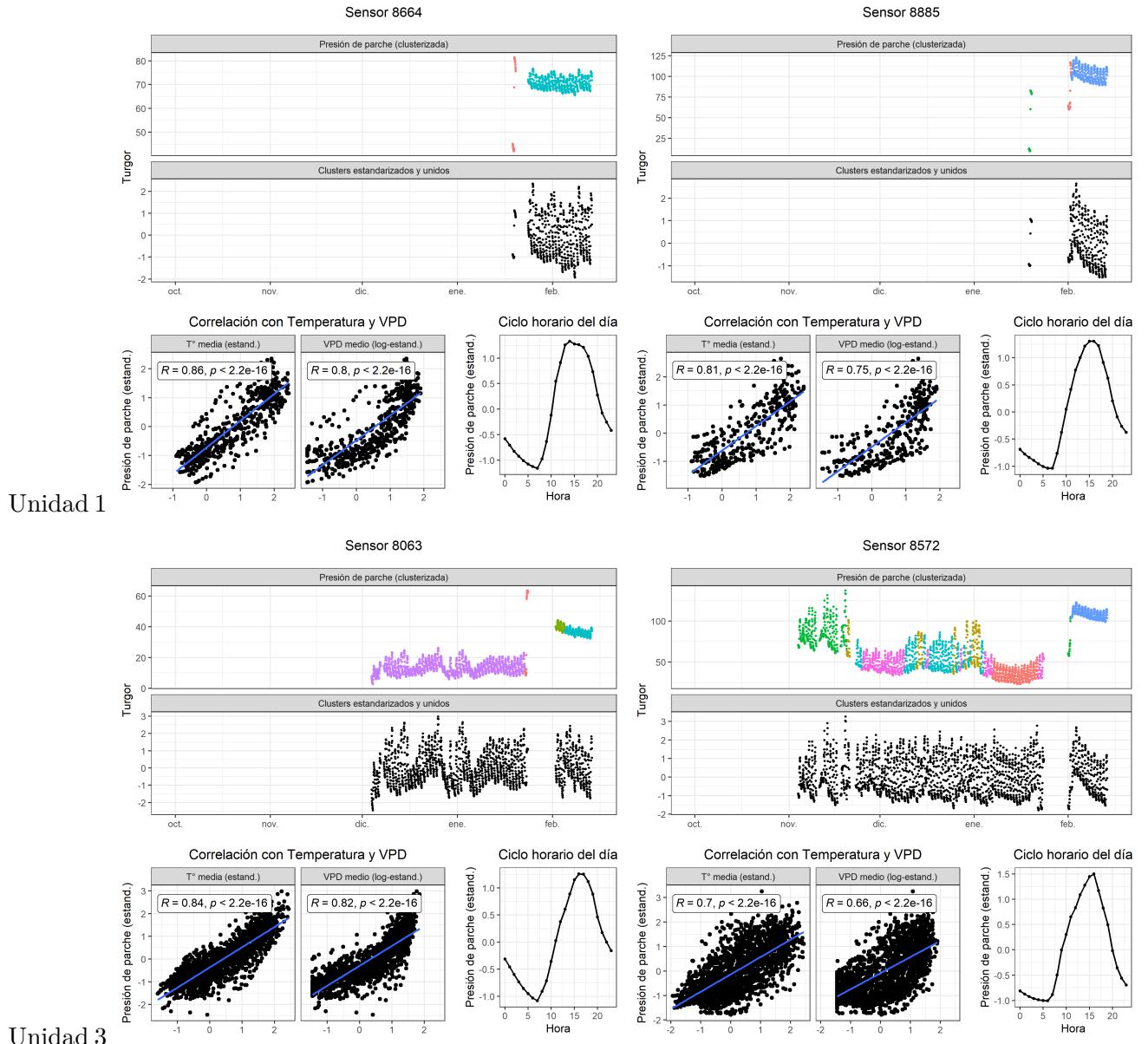
94 T4 (2022-2023)



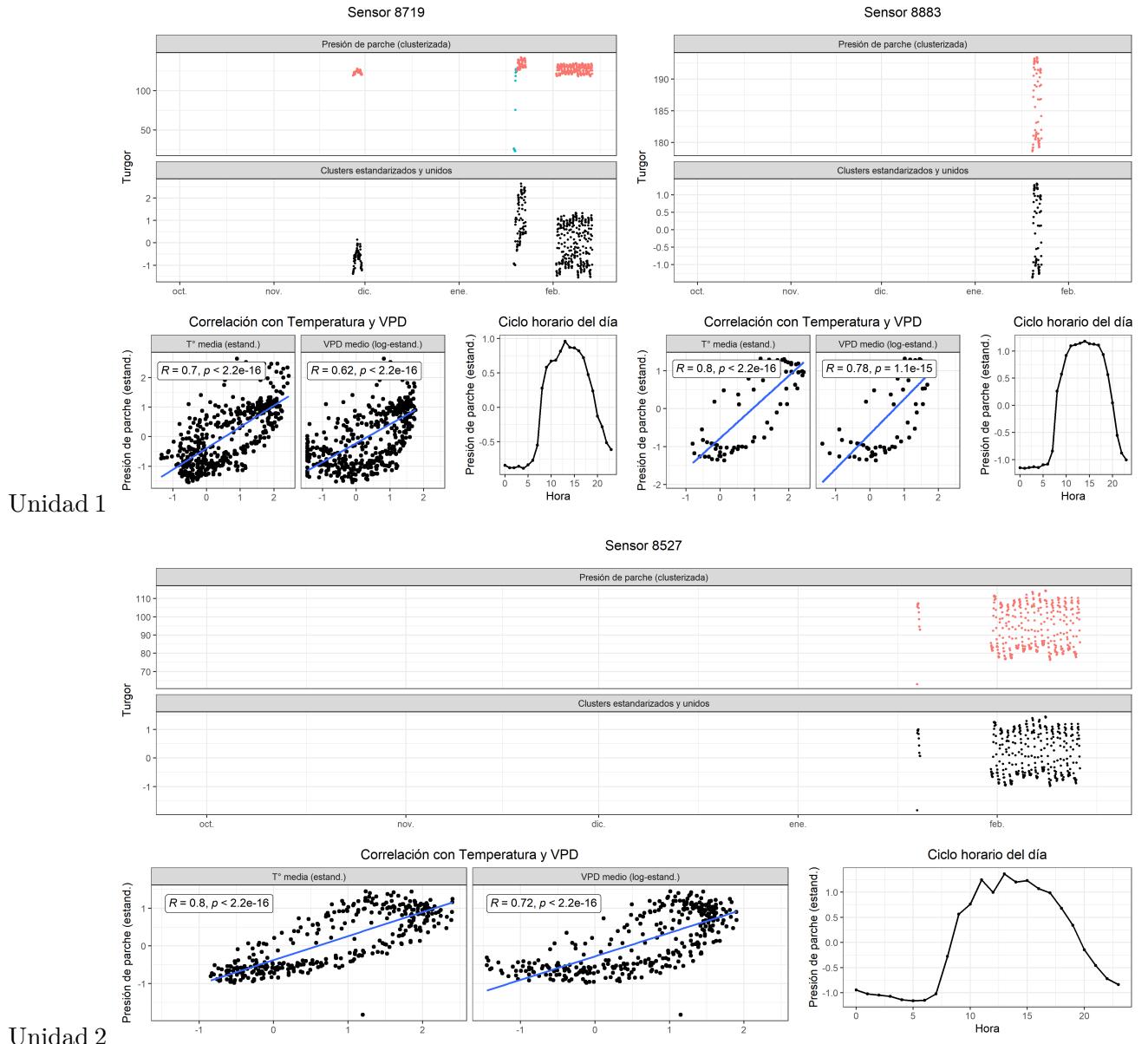
Unidad 3

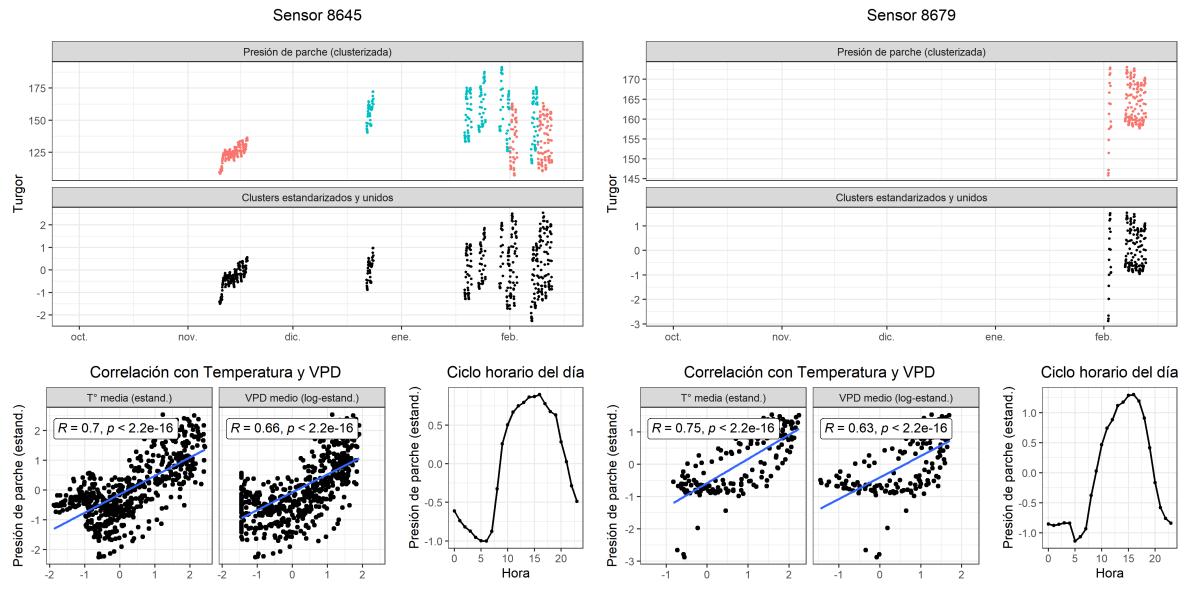


95 T1 (2023-2024)



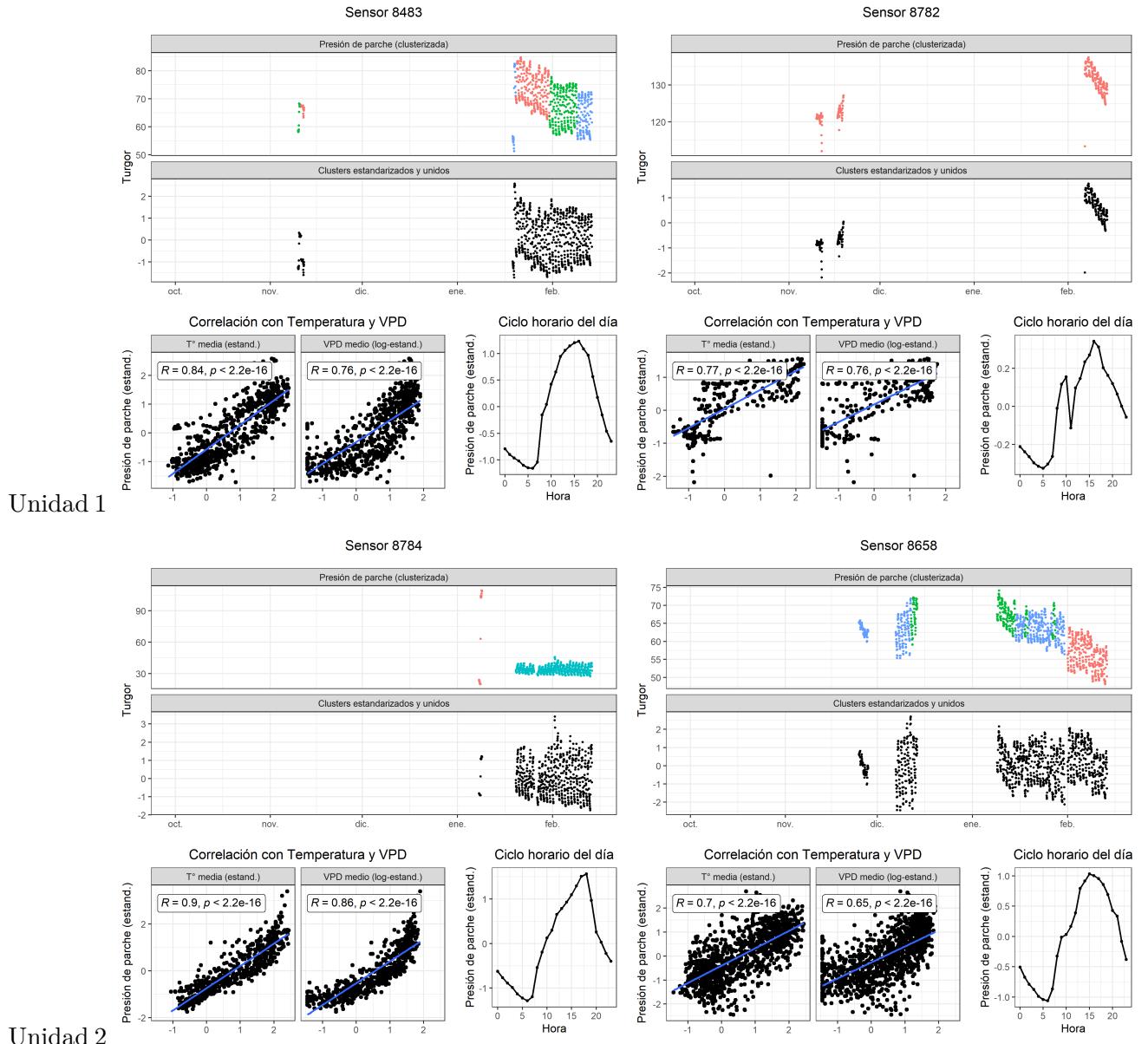
96 T2 (2023-2024)

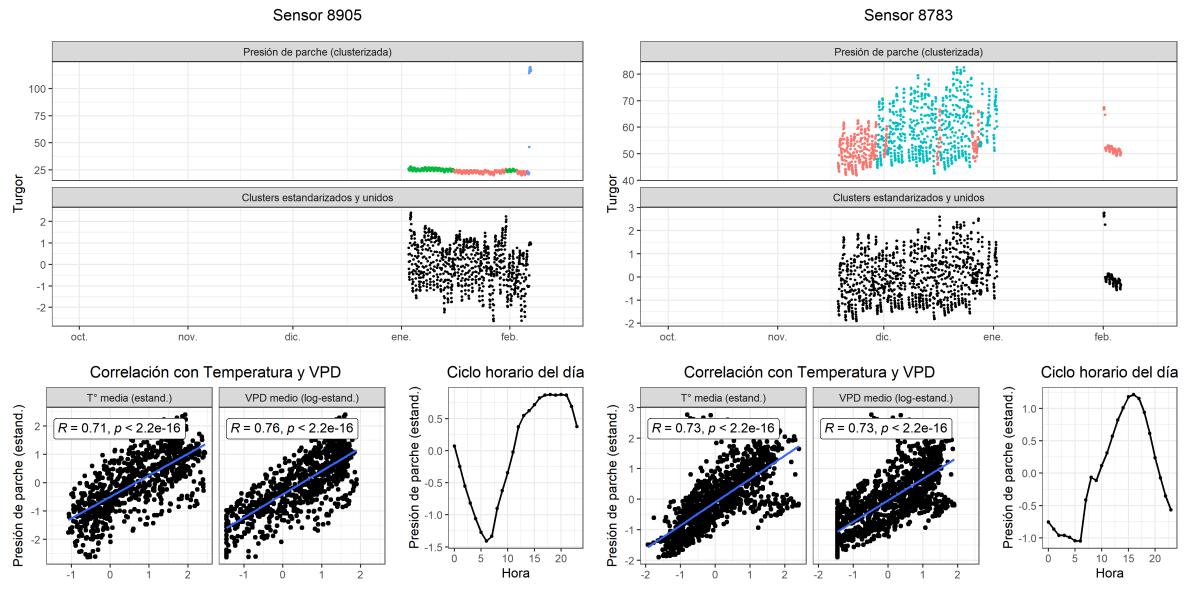




Unidad 3

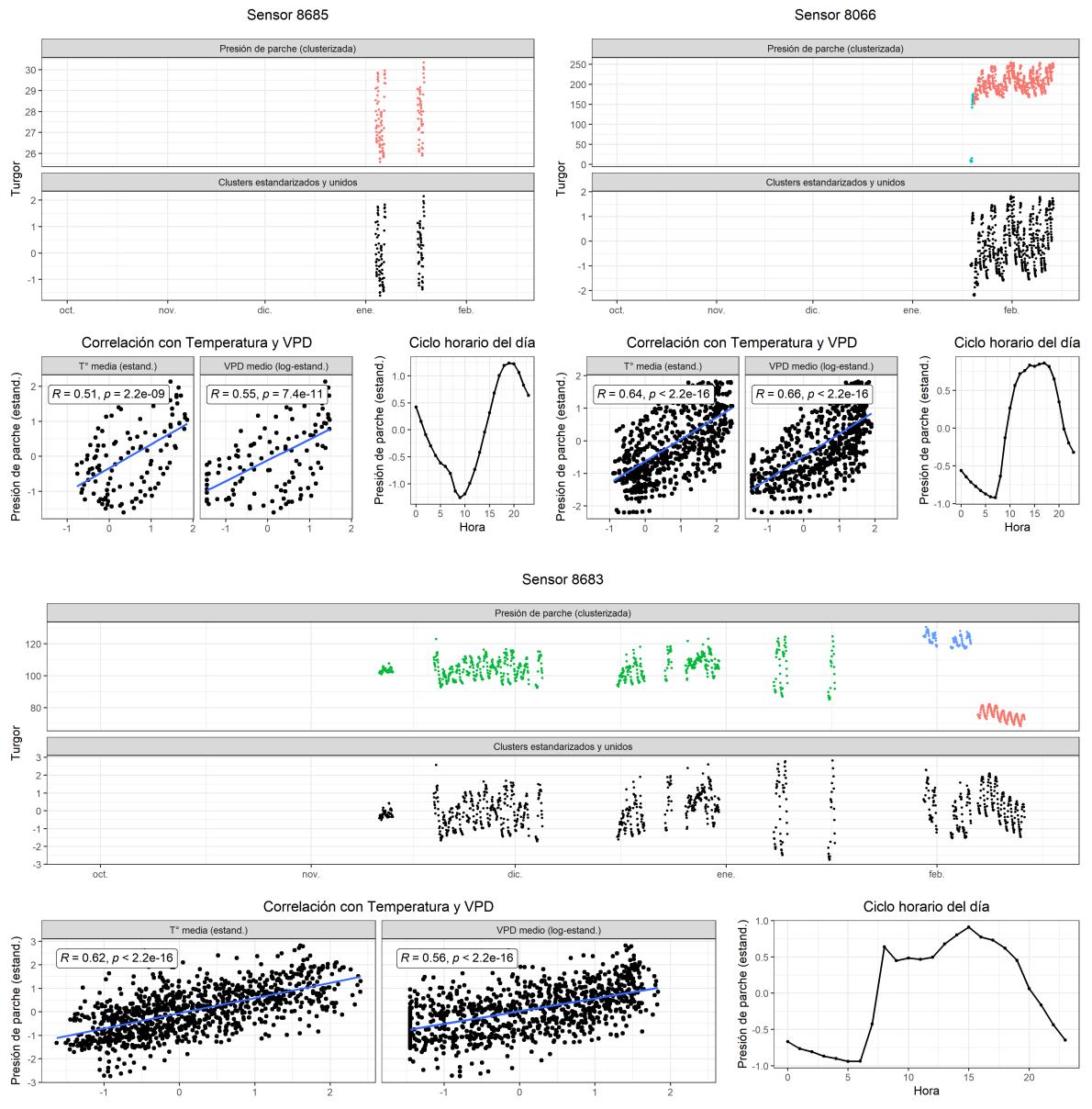
97 T3 (2023-2024)

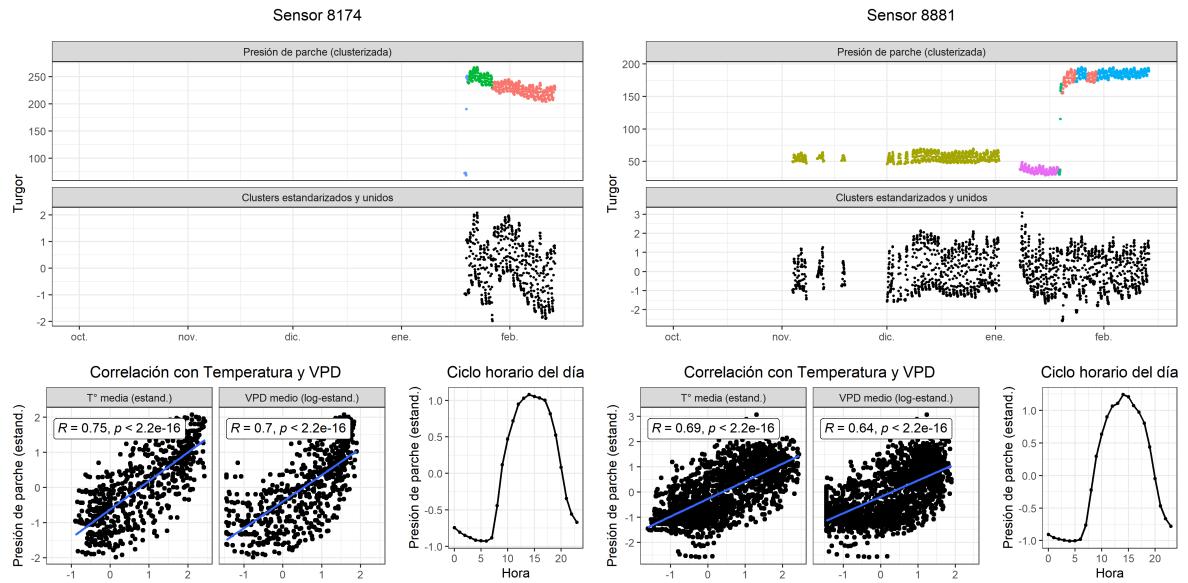




Unidad 3

98 T4 (2023-2024)





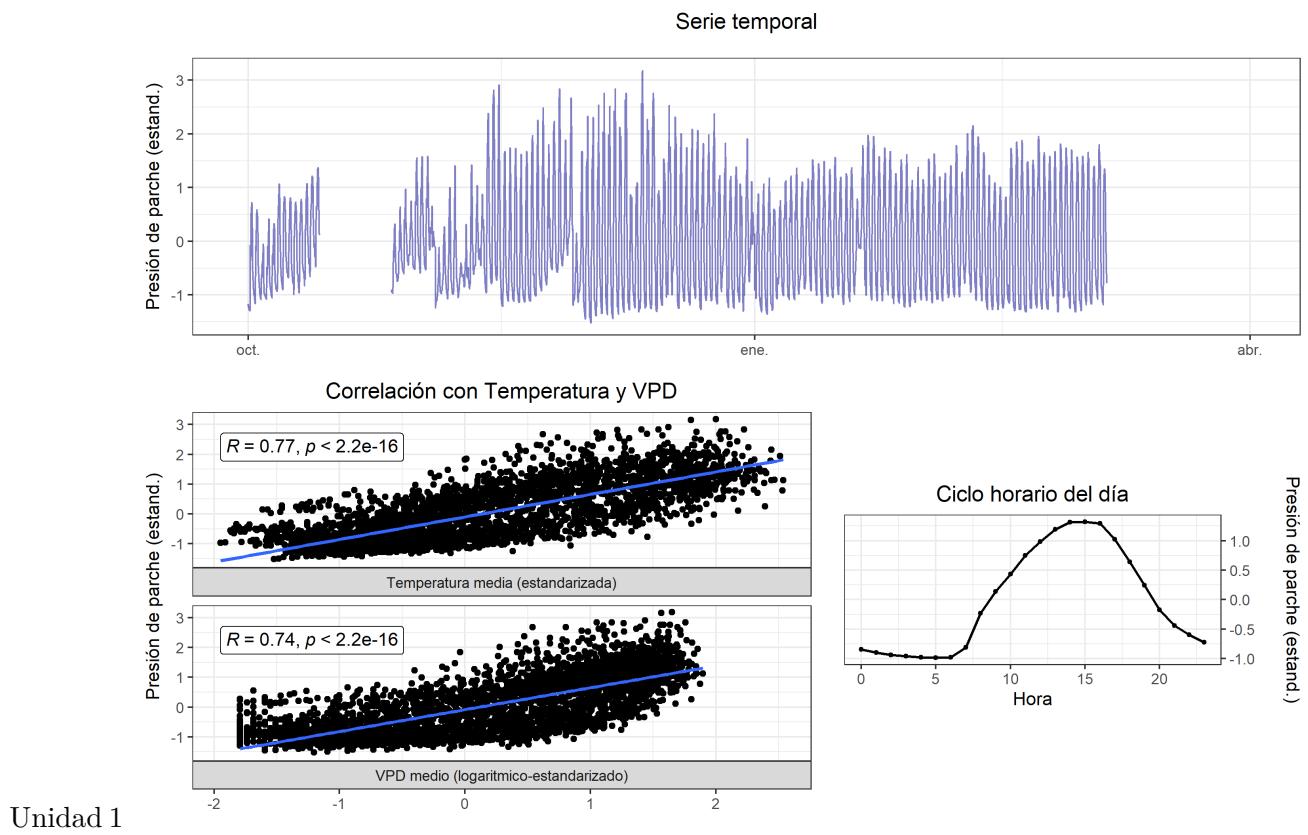
99 Datos preprocesados

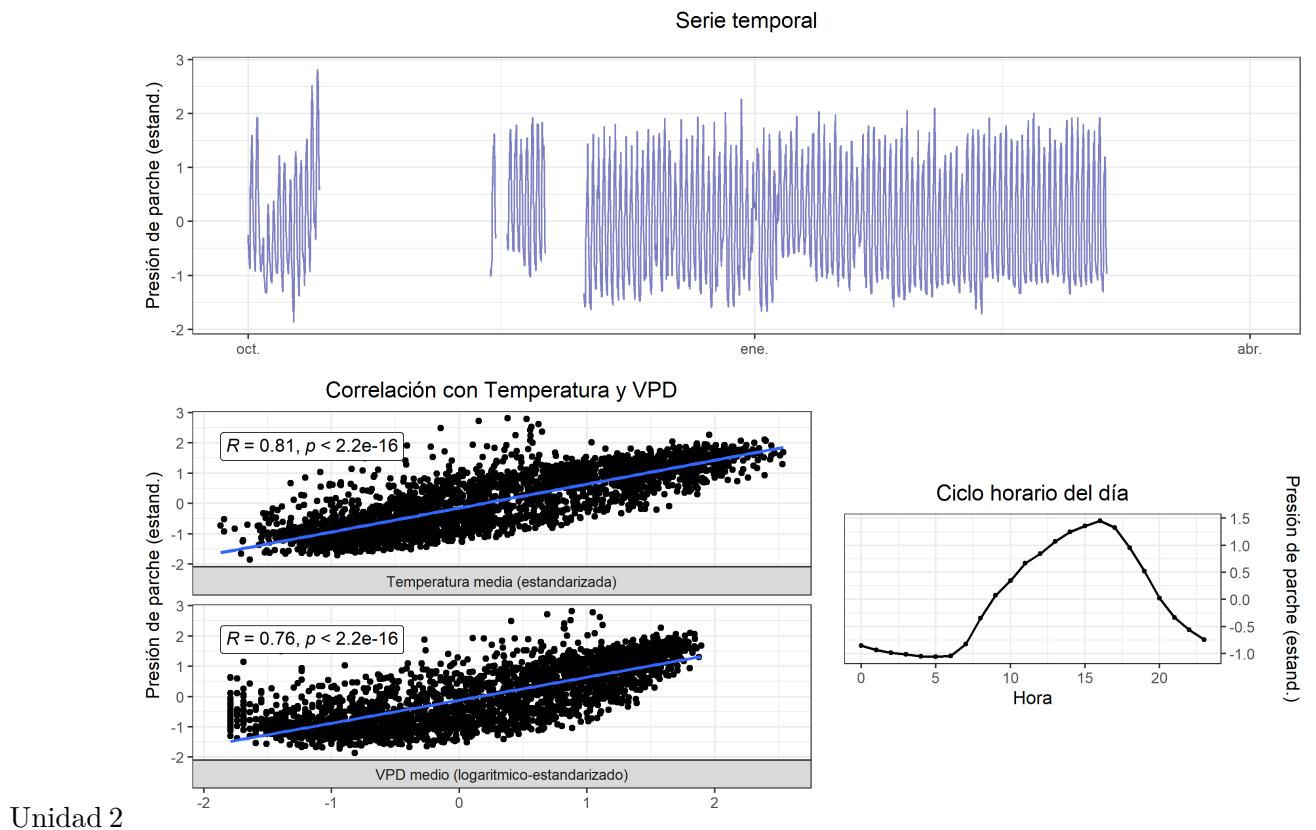
99.1 A nivel de unidad

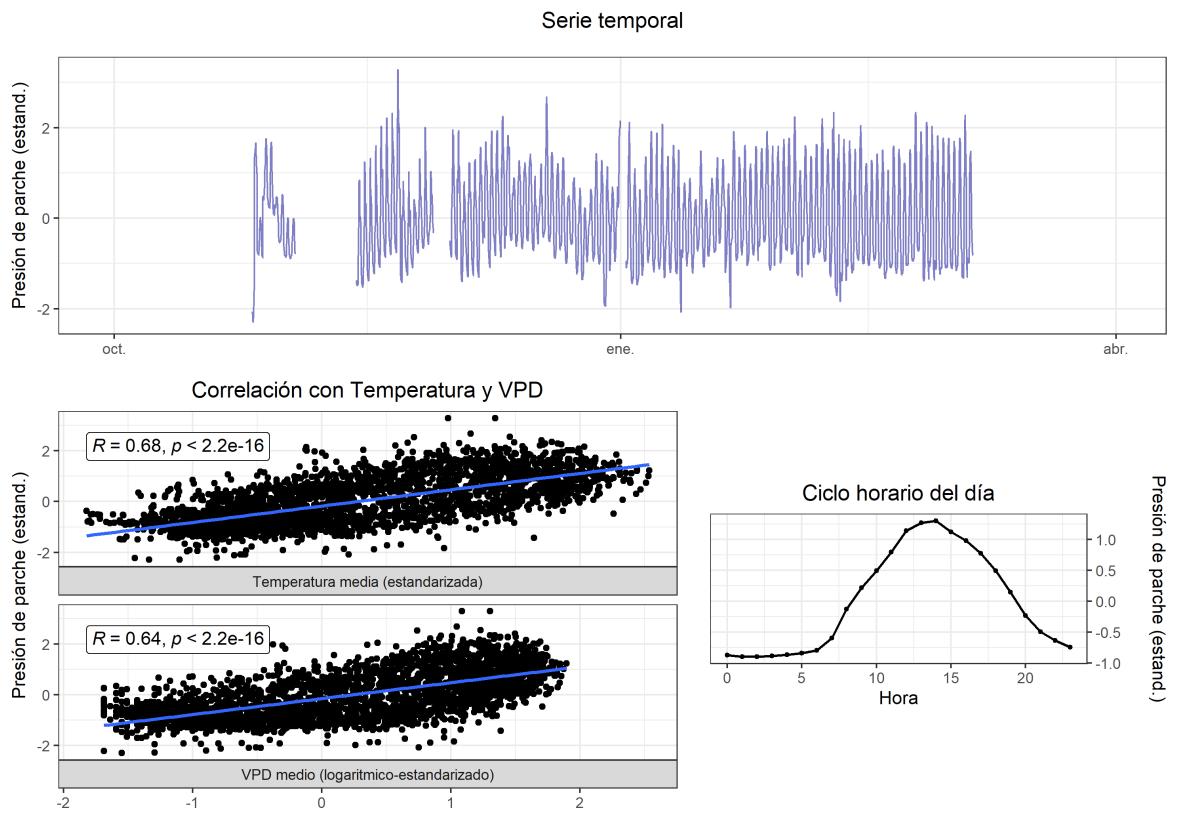
Para obtener el turgor preprocesado por árbol según tratamiento, se promediaron las series de los sensores por cada unidad, obteniendo una serie única para cada árbol de los tratamientos.

99.1.1 La Esperanza

100 T1 (2022-2023)

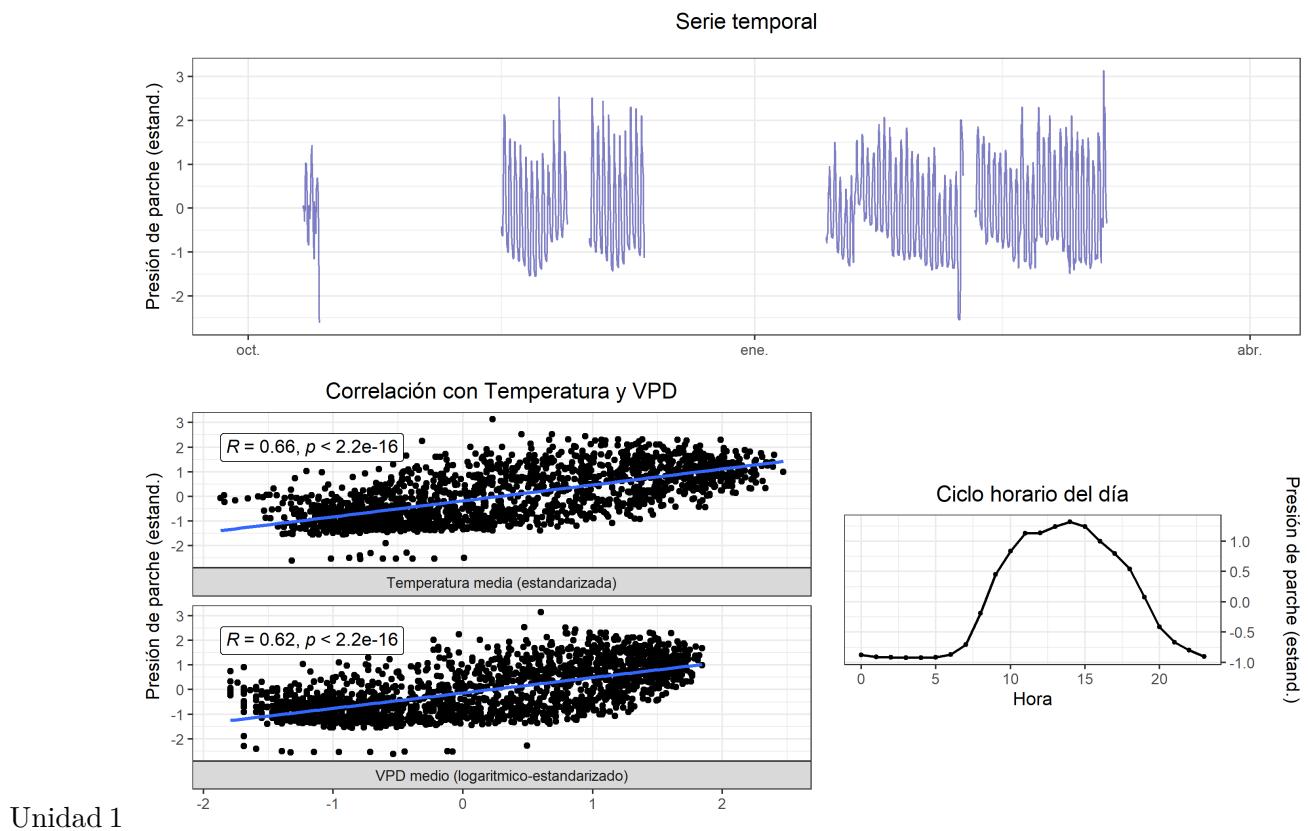


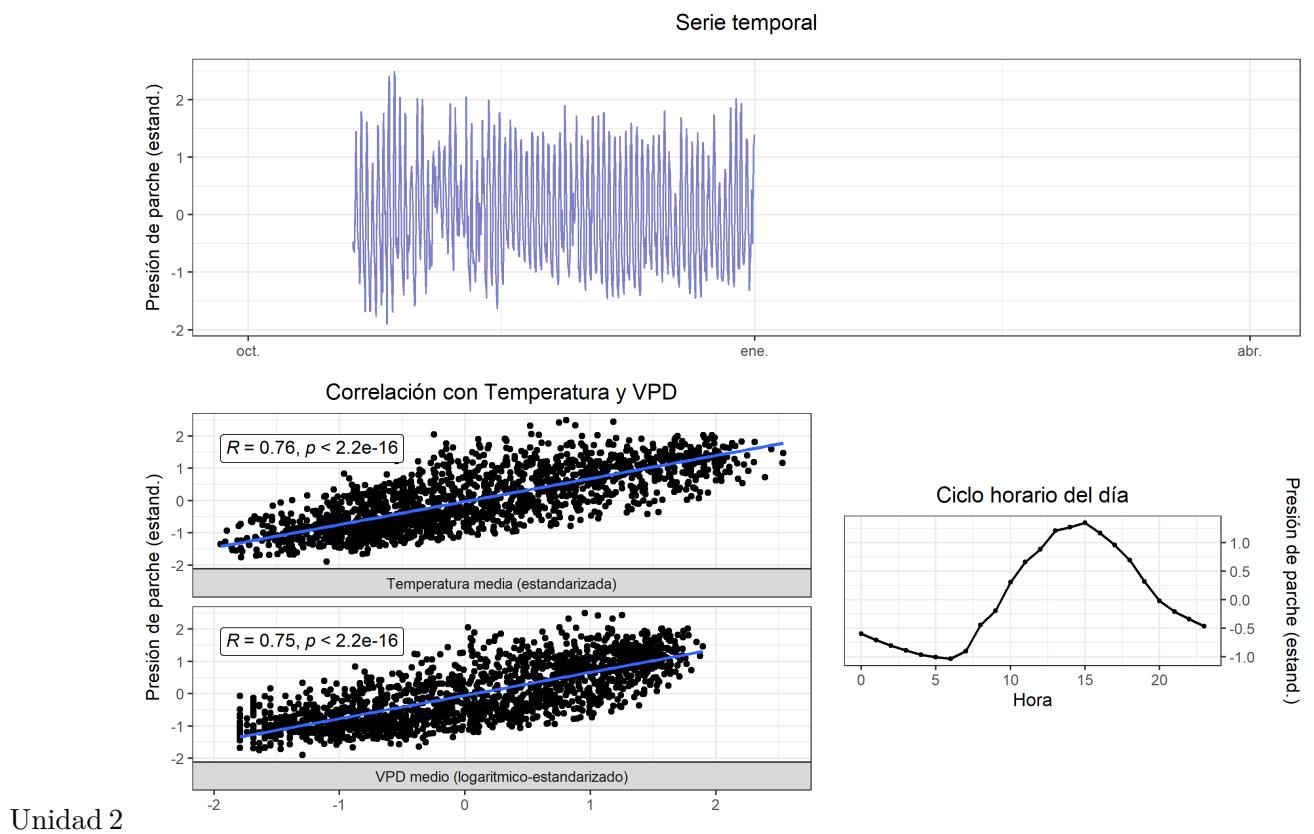




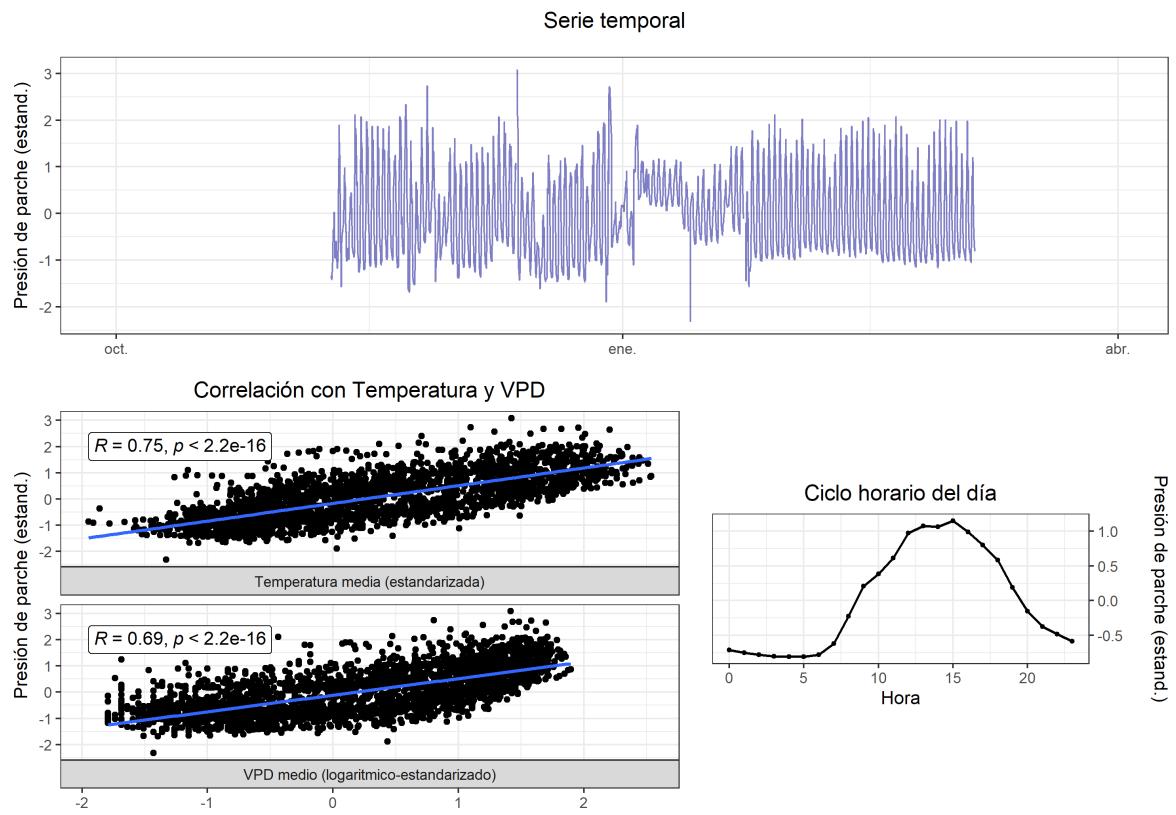
Unidad 3

101 T2 (2022-2023)

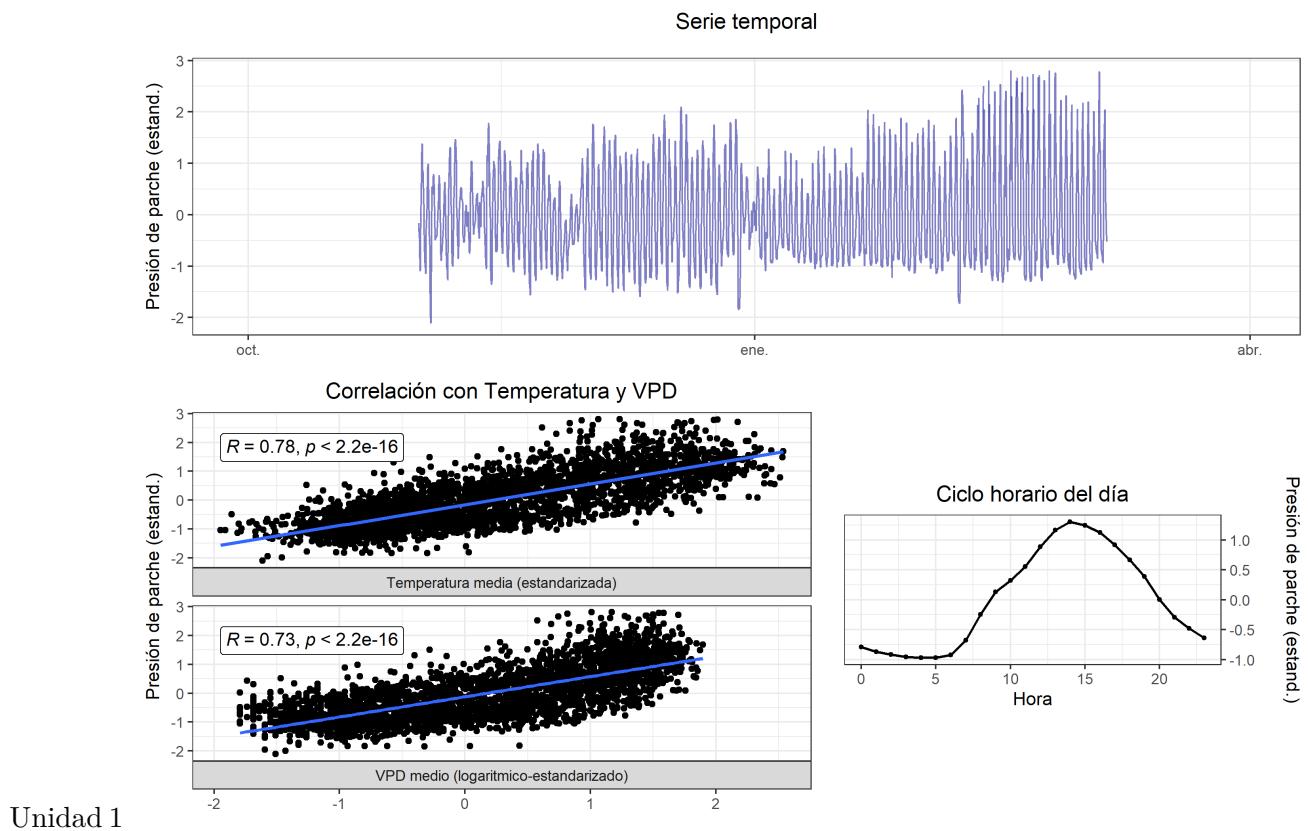


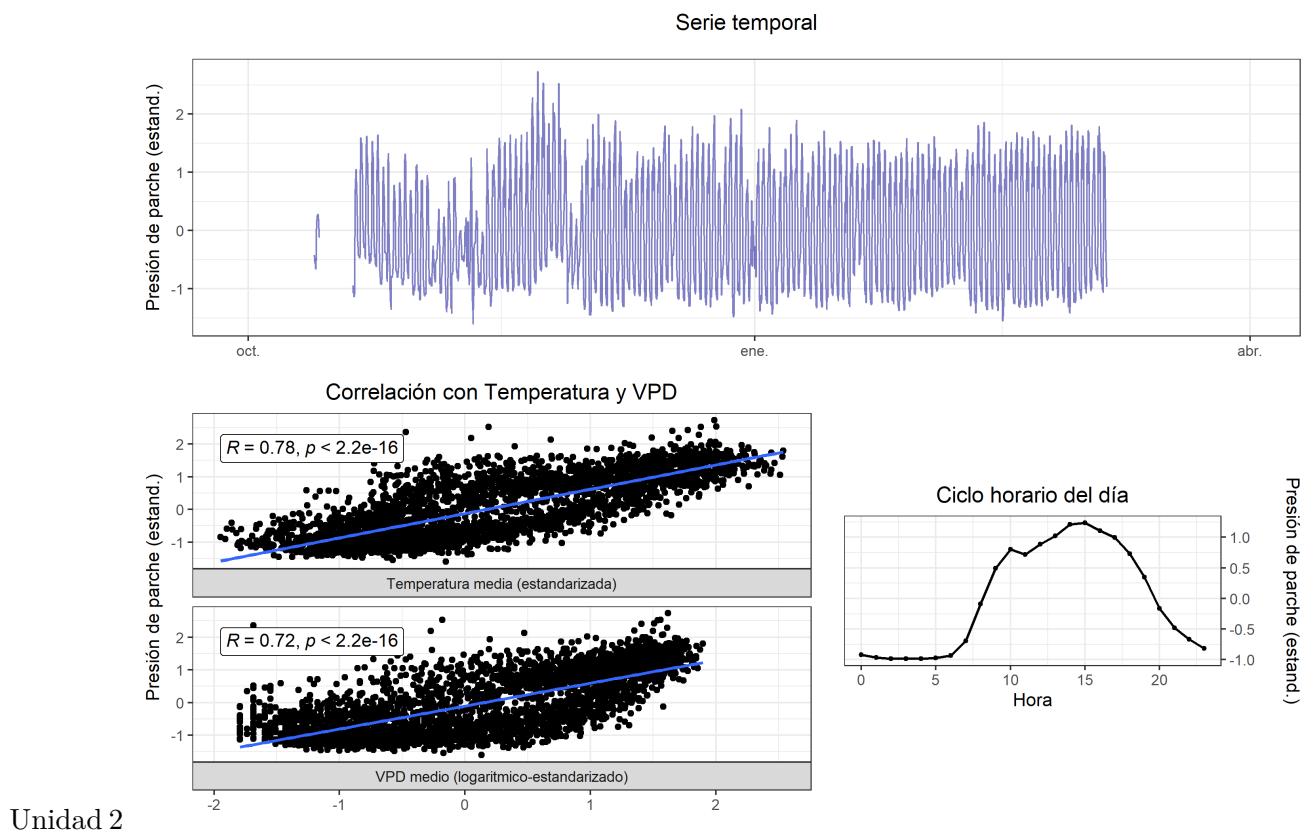


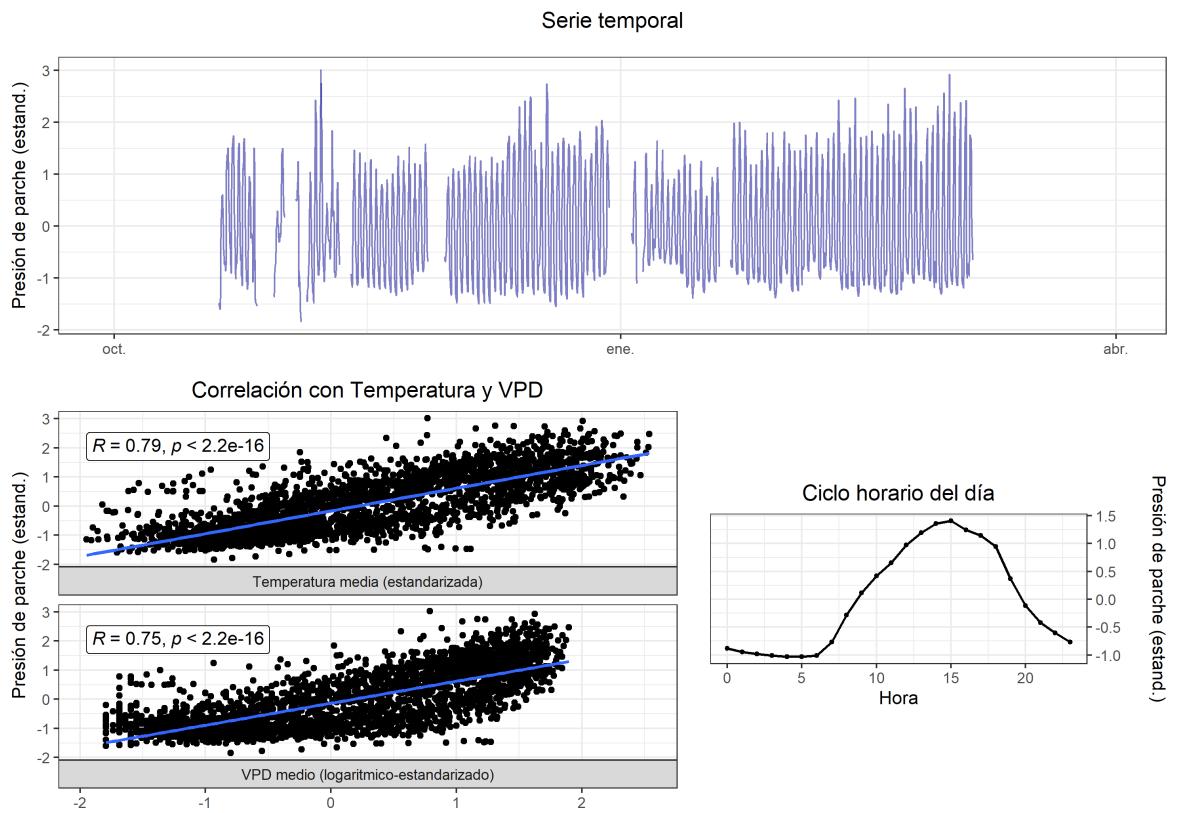
Unidad 3



102 T3 (2022-2023)

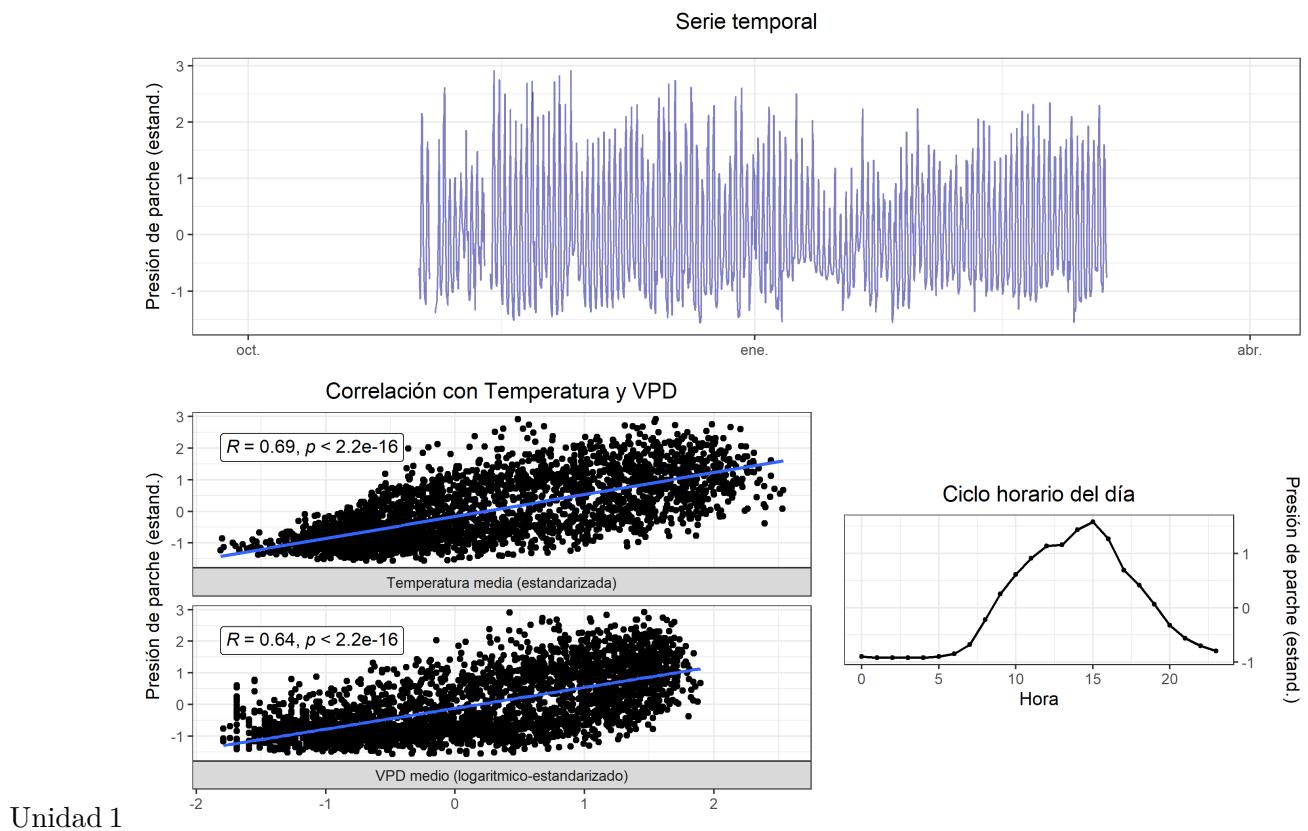


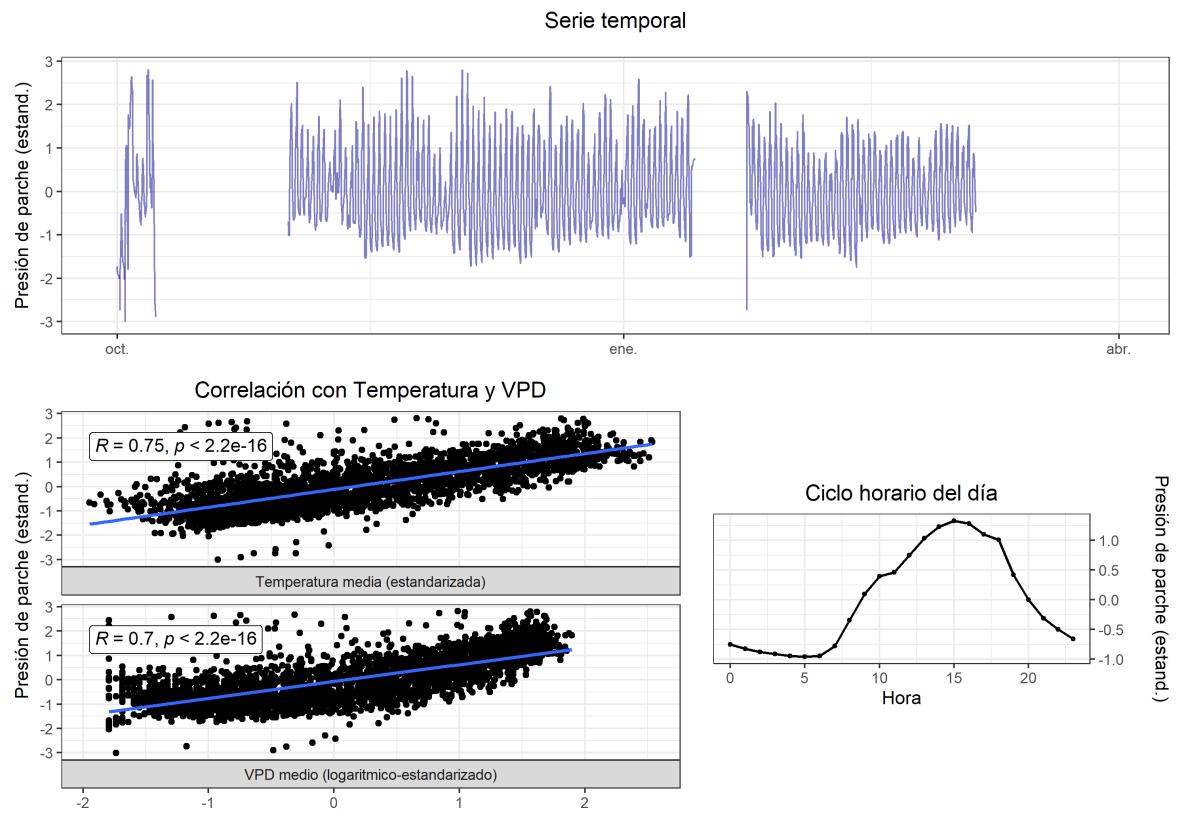




Unidad 3

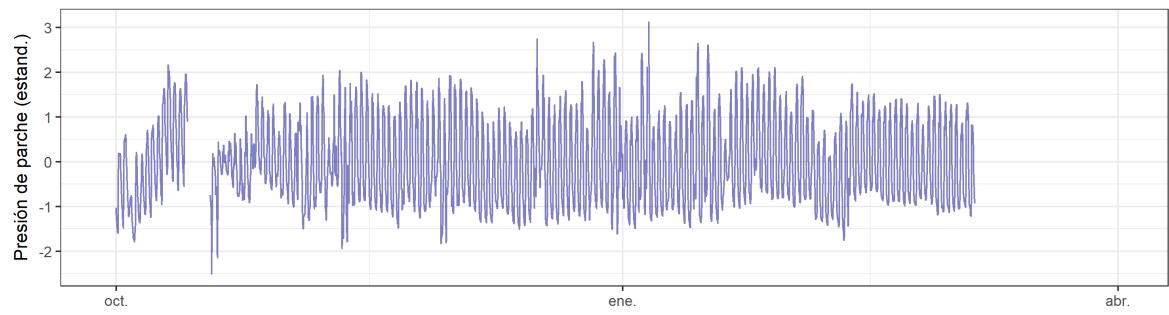
103 T4 (2022-2023)



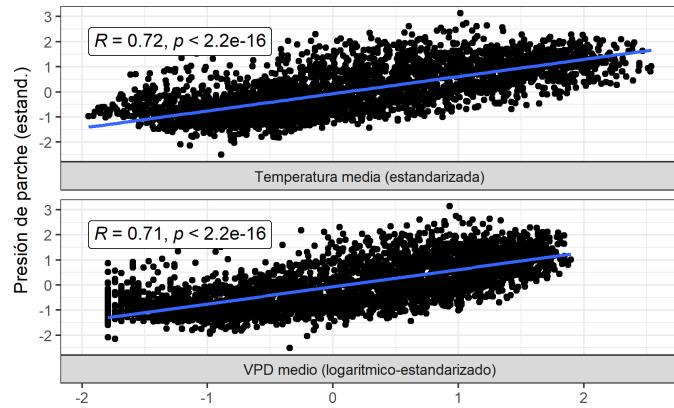


Unidad 2

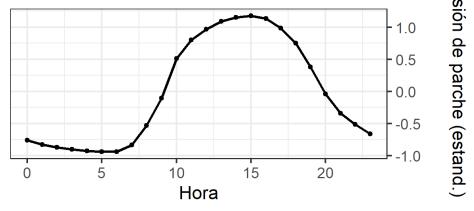
Serie temporal



Correlación con Temperatura y VPD

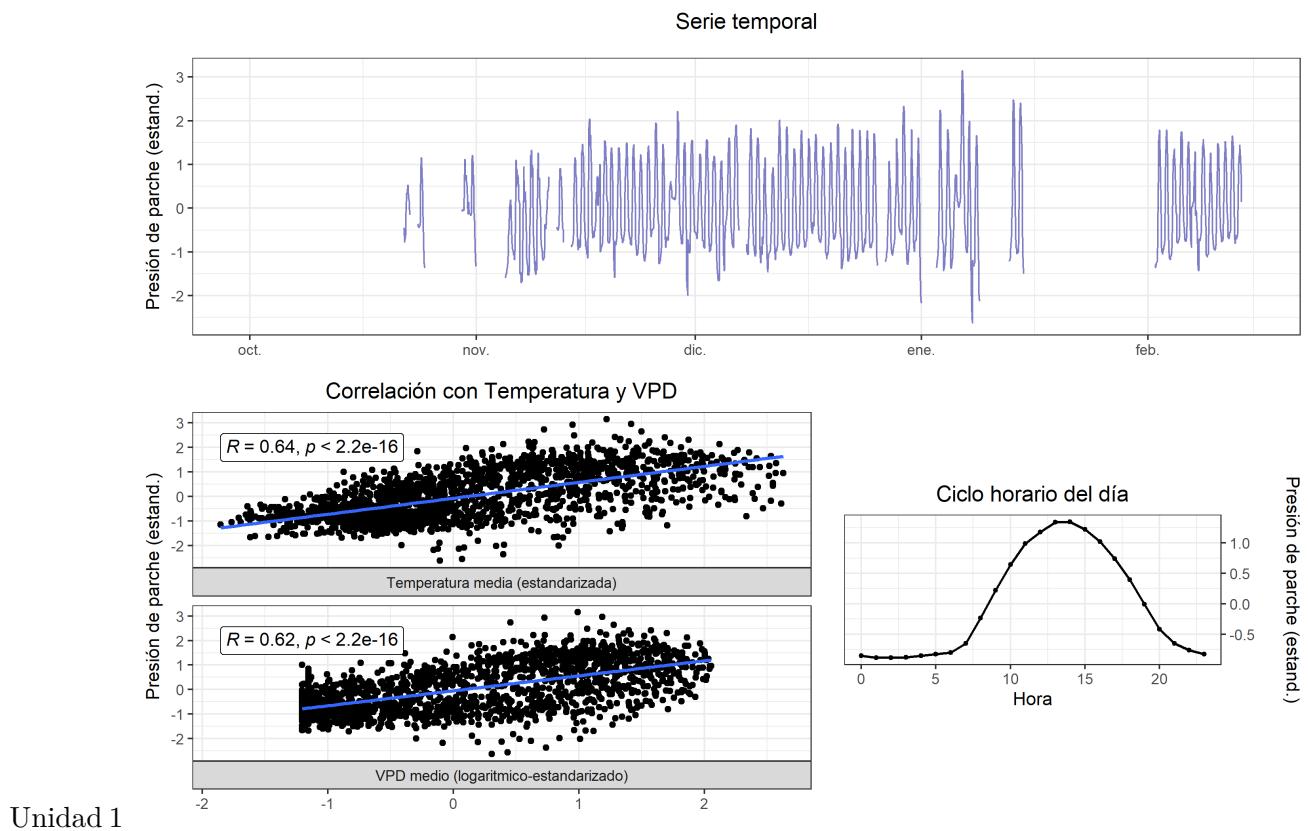


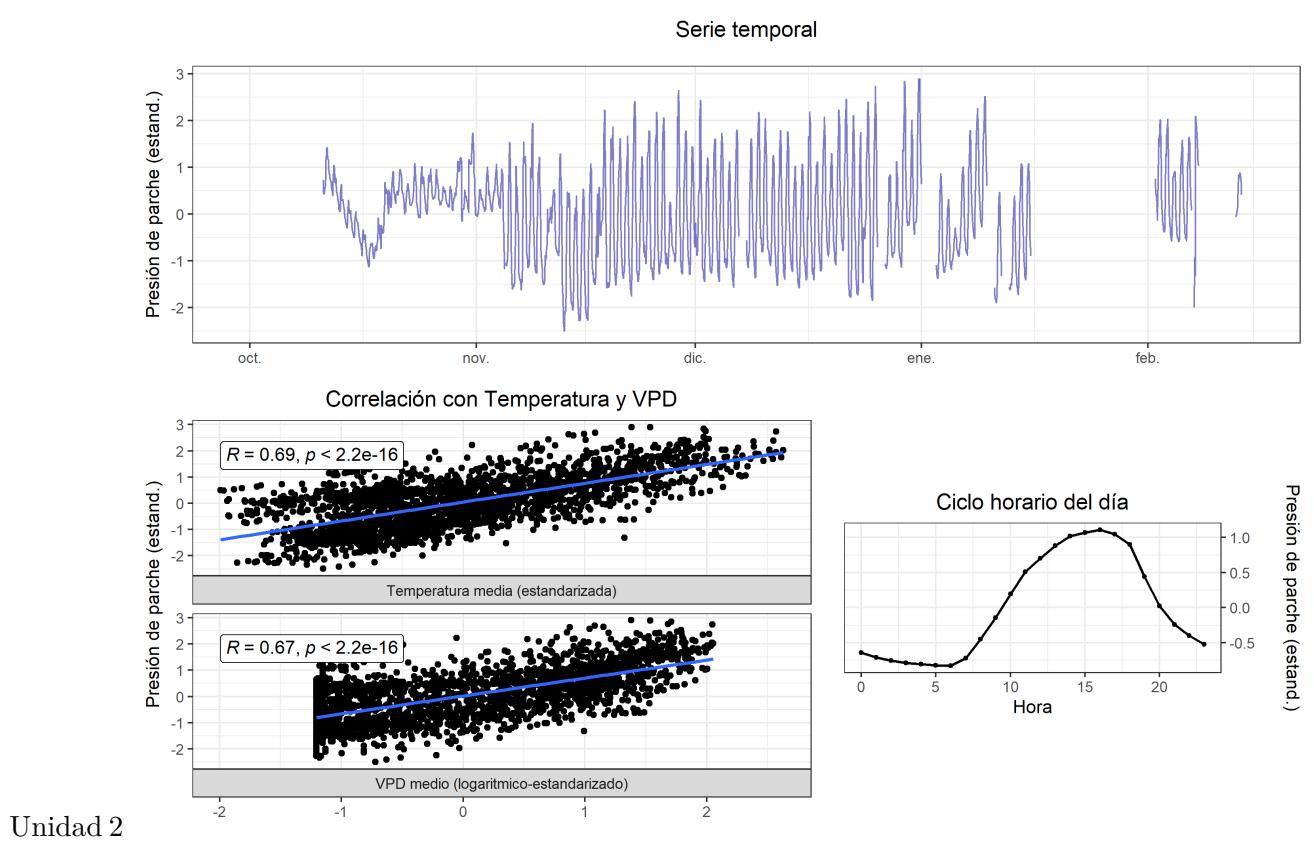
Ciclo horario del día



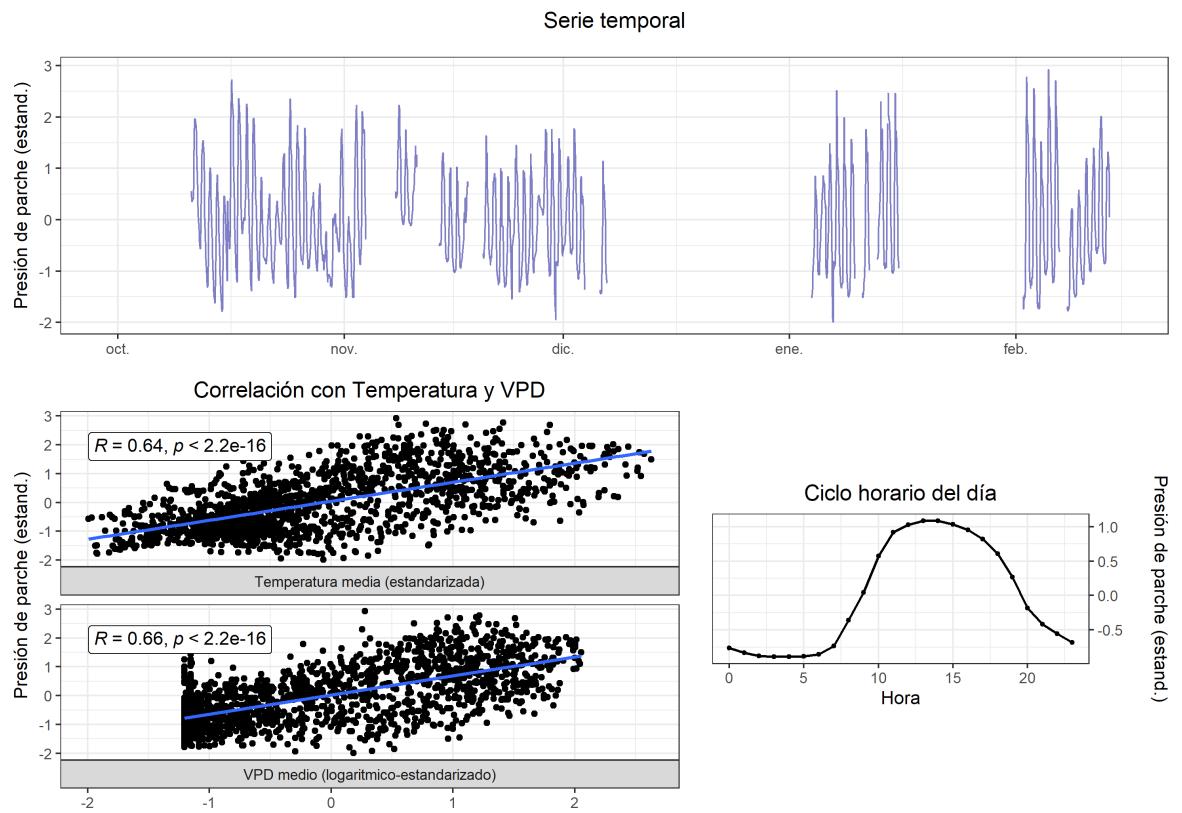
Unidad 3

104 T1 (2023-2024)



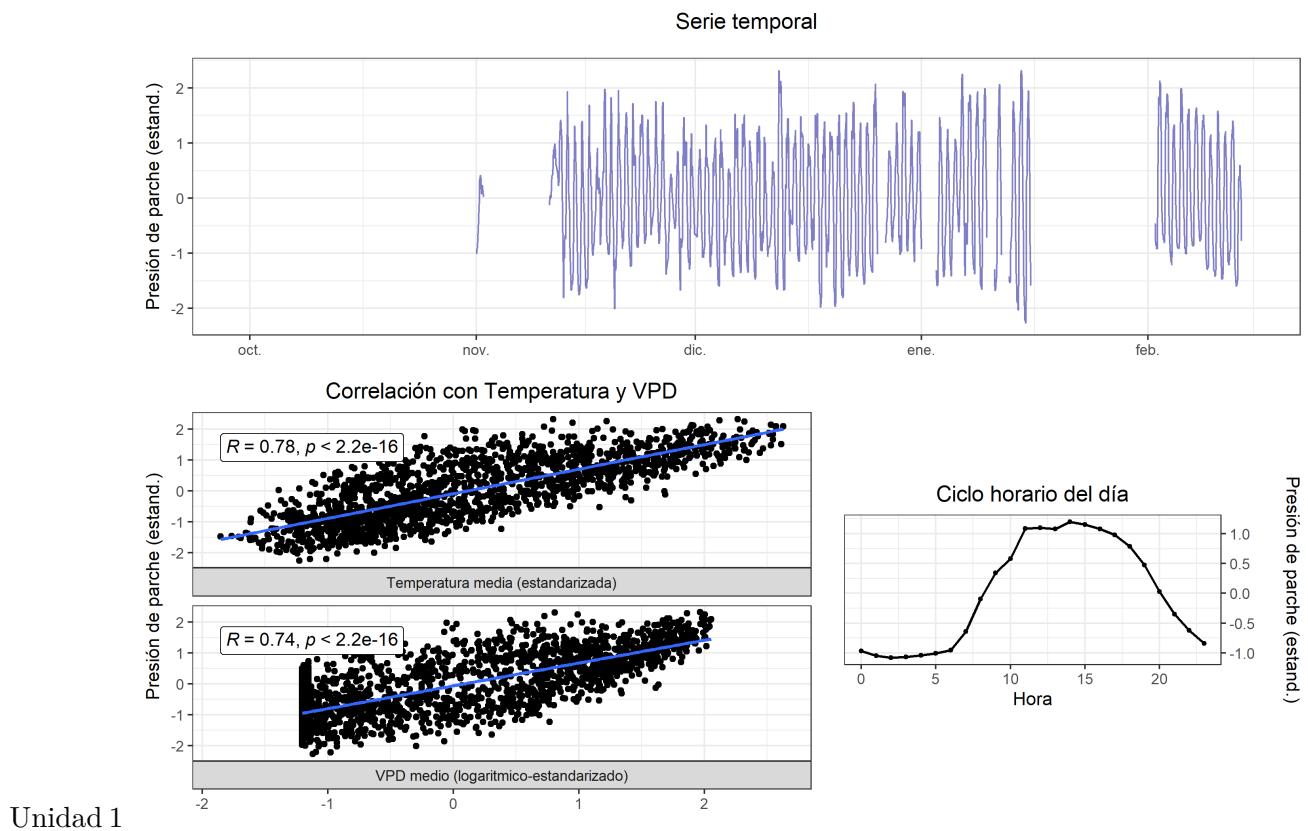


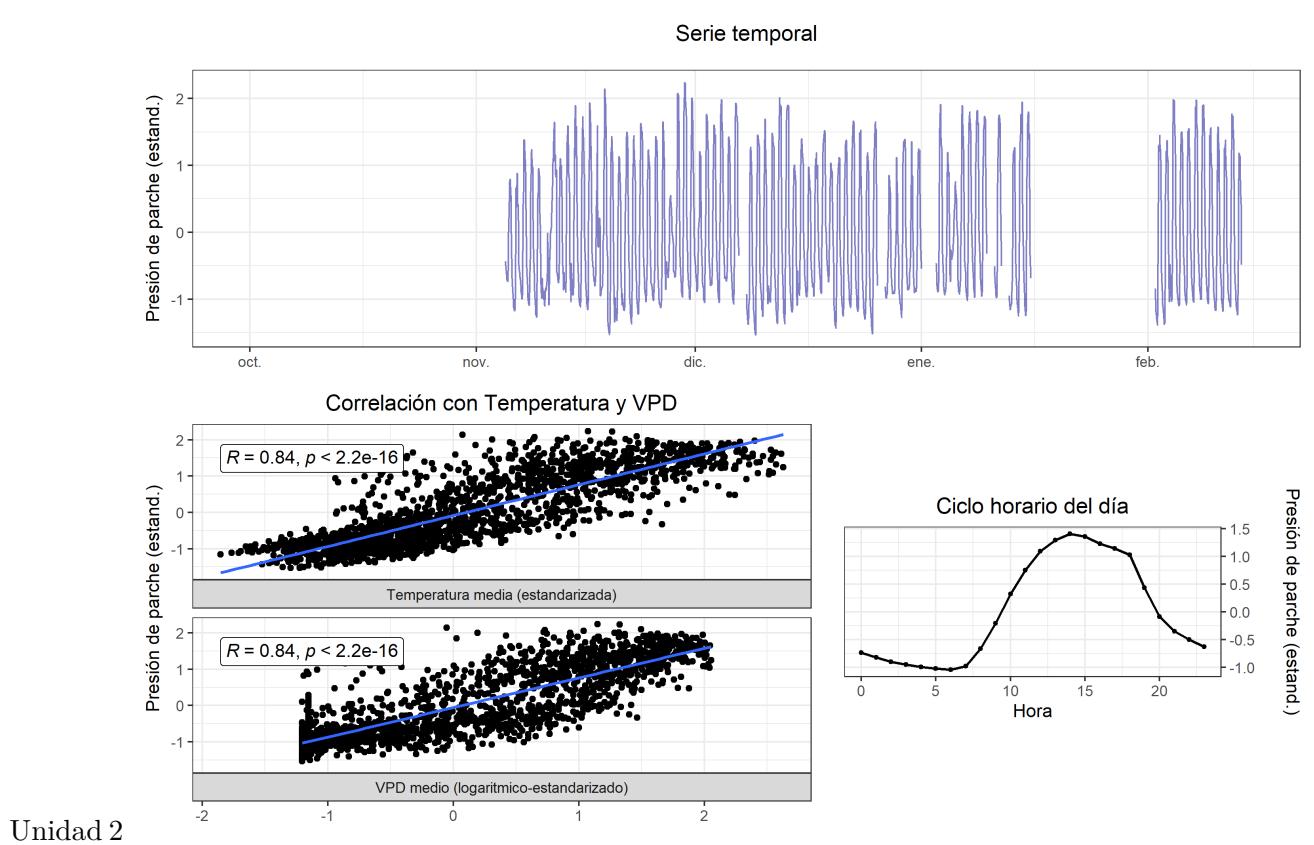
Unidad 2



Unidad 3

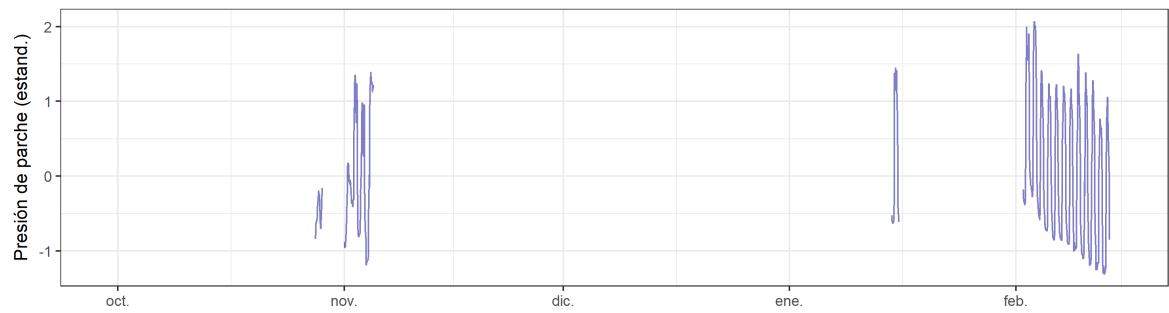
105 T2 (2023-2024)



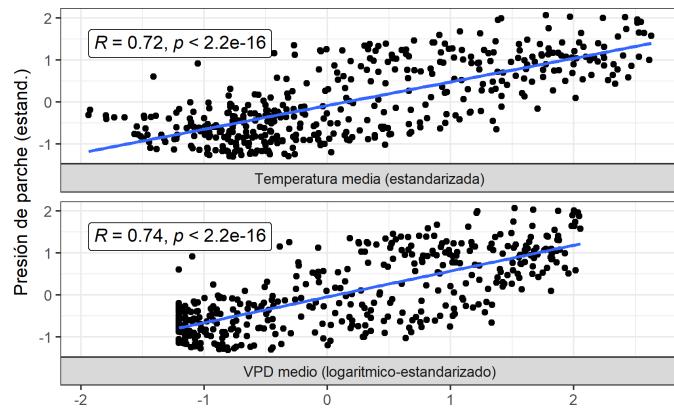


Unidad 2

Serie temporal



Correlación con Temperatura y VPD

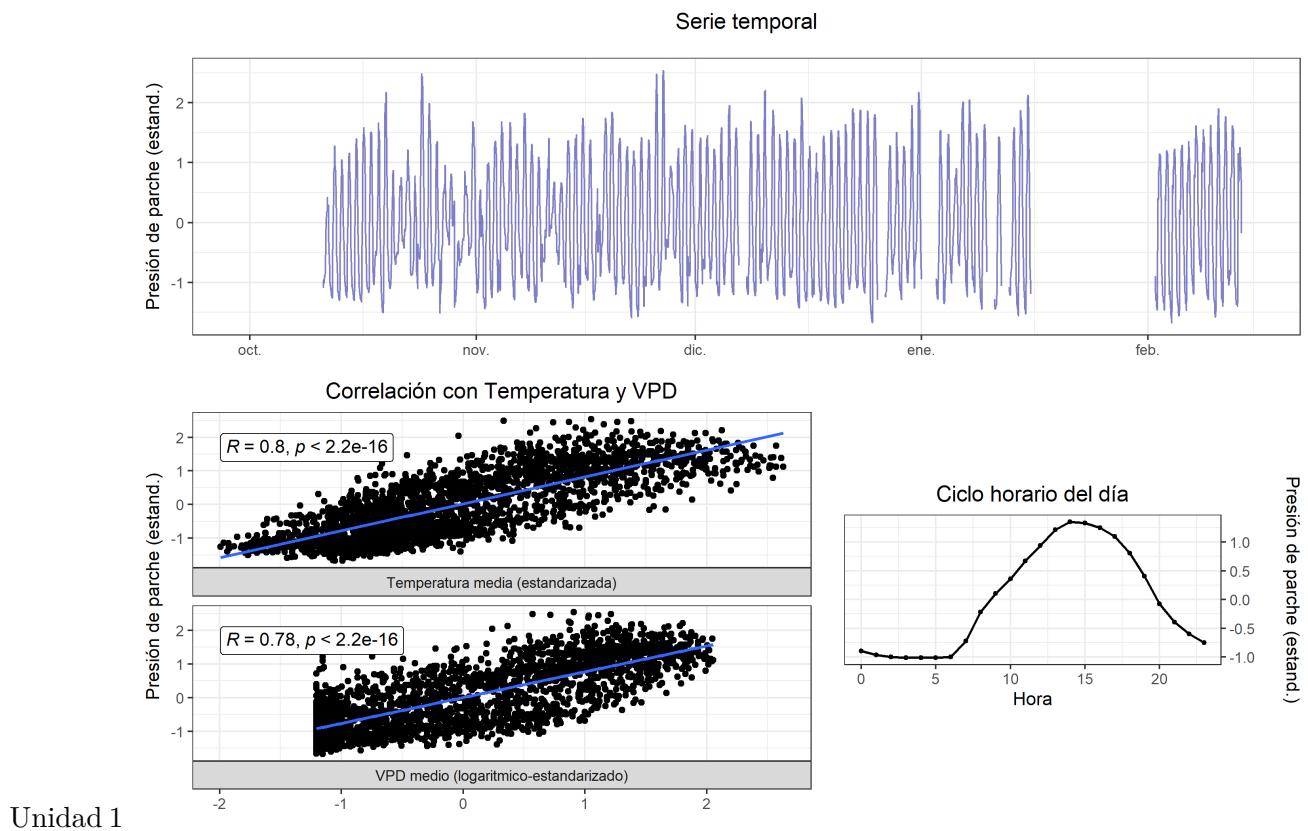


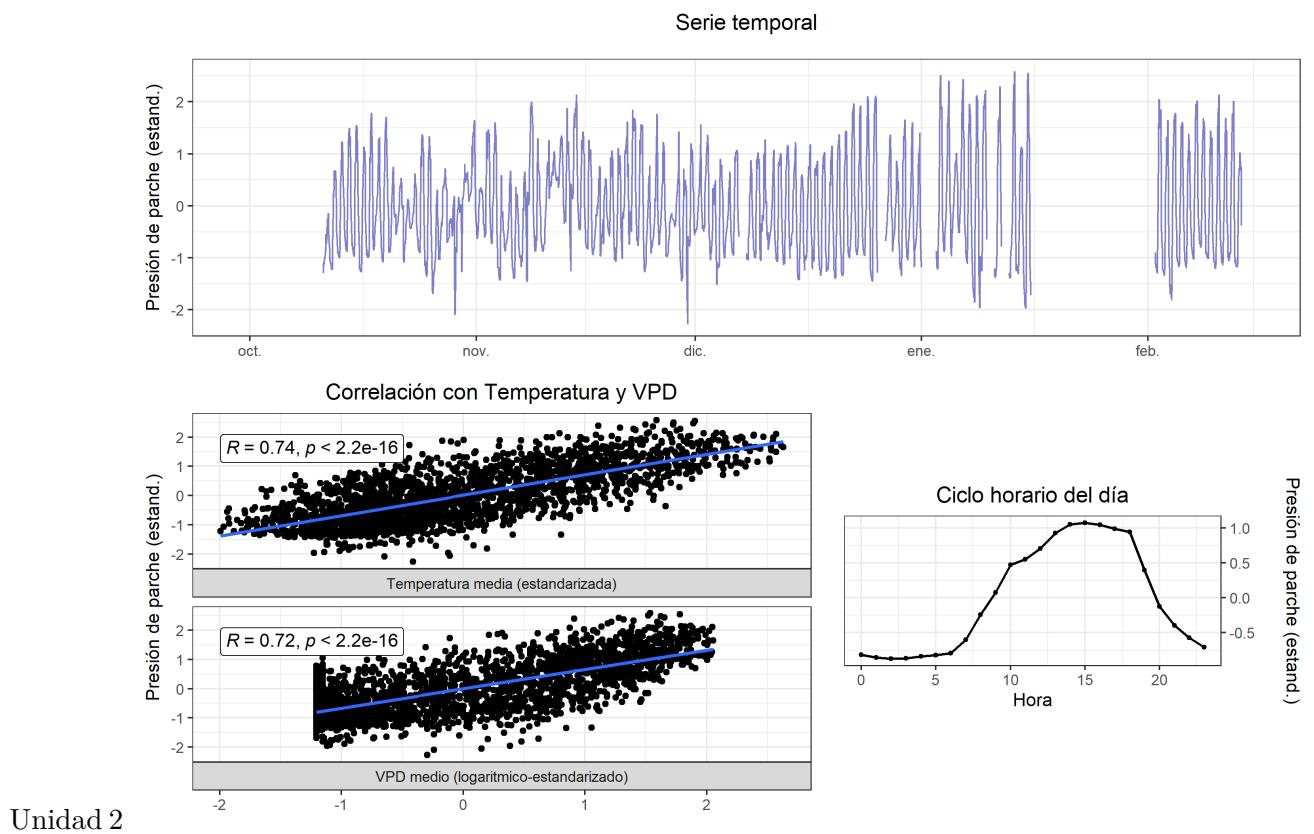
Ciclo horario del día

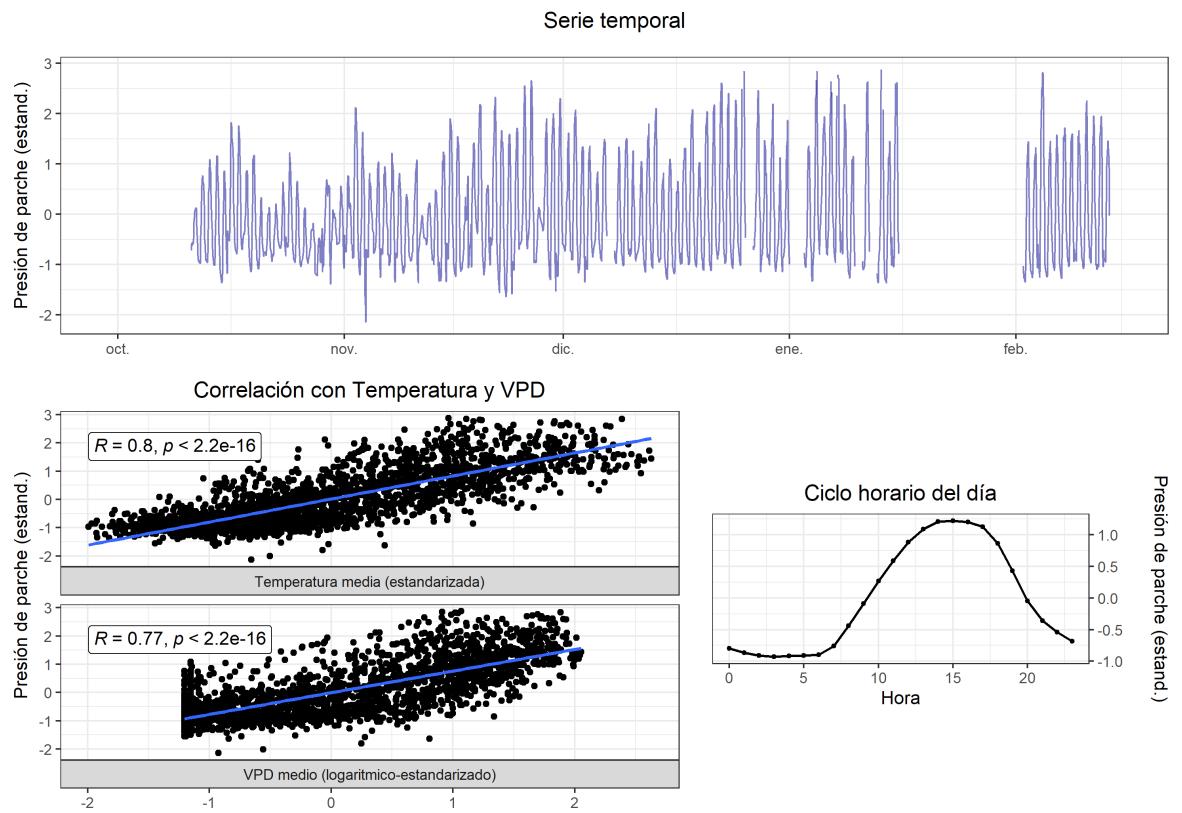


Unidad 3

106 T3 (2023-2024)

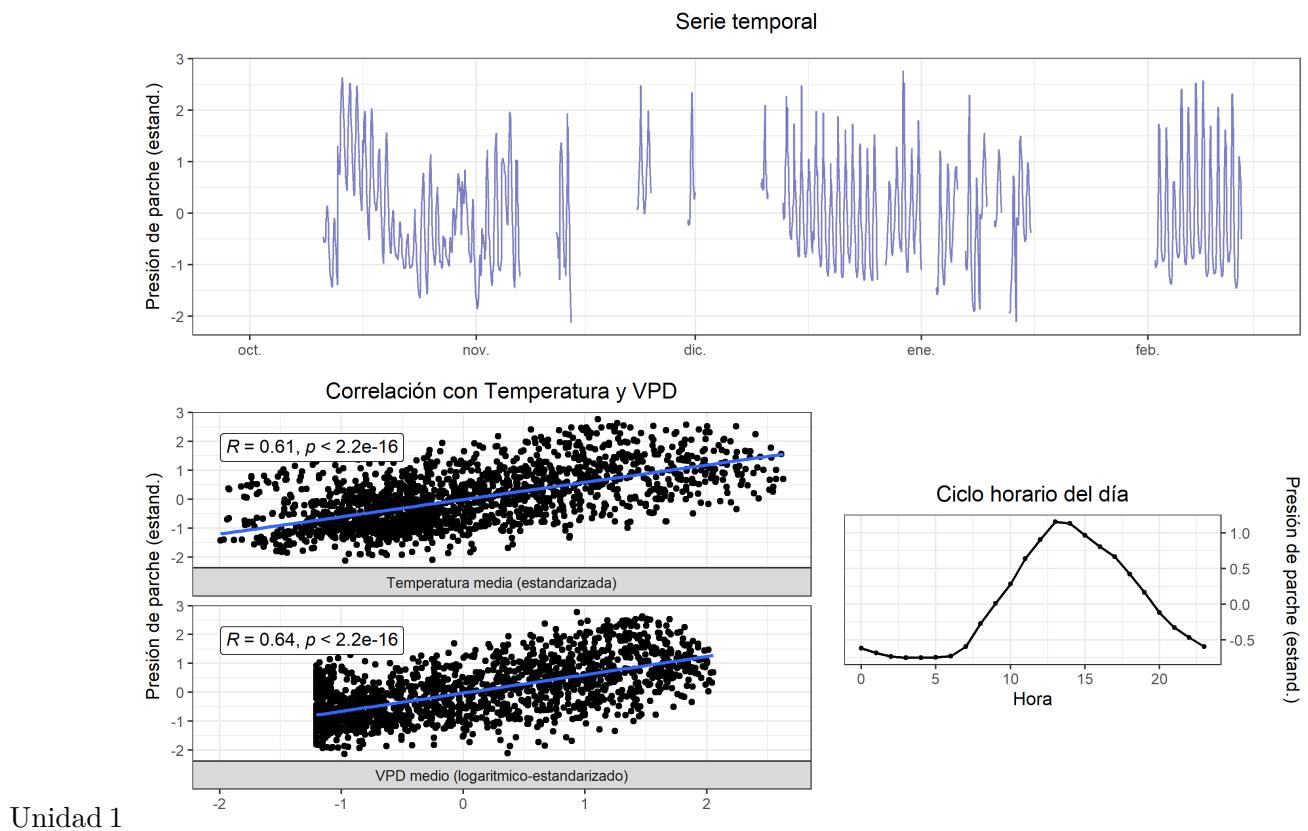




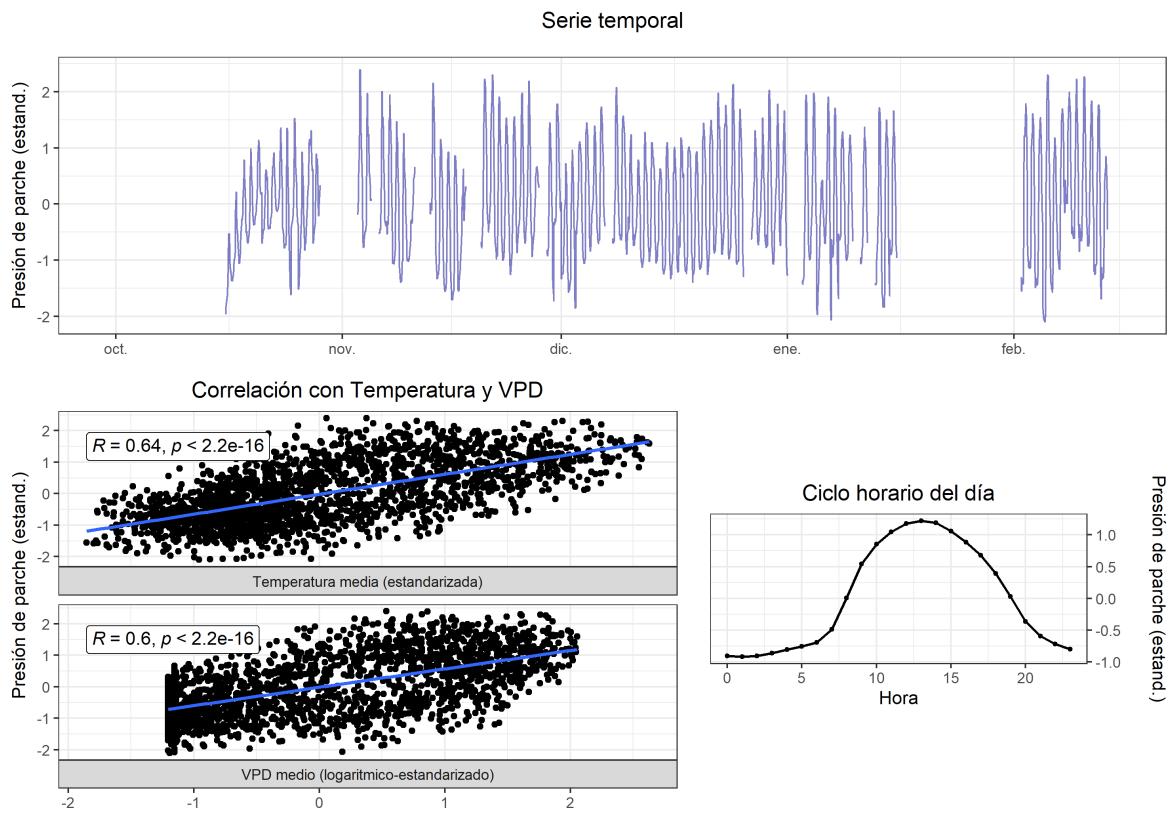


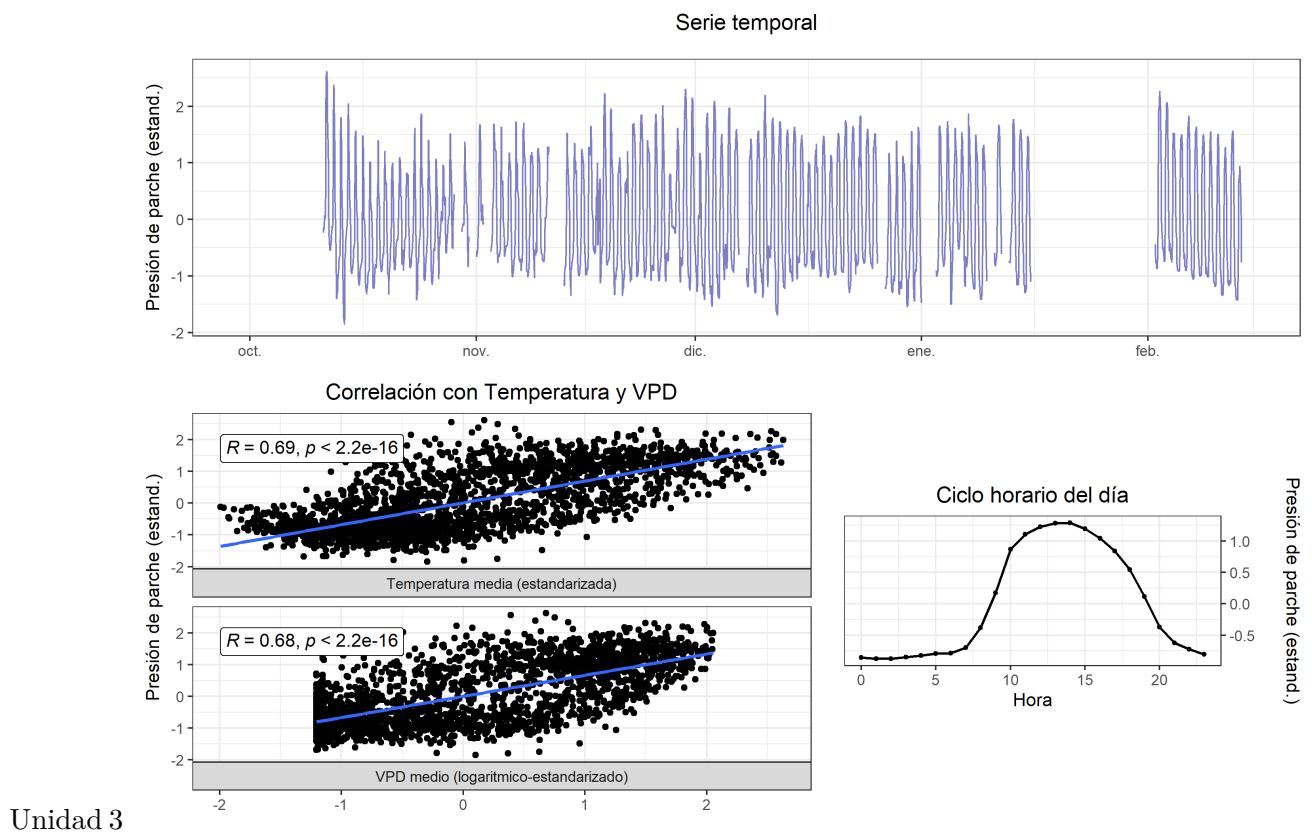
Unidad 3

107 T4 (2023-2024)



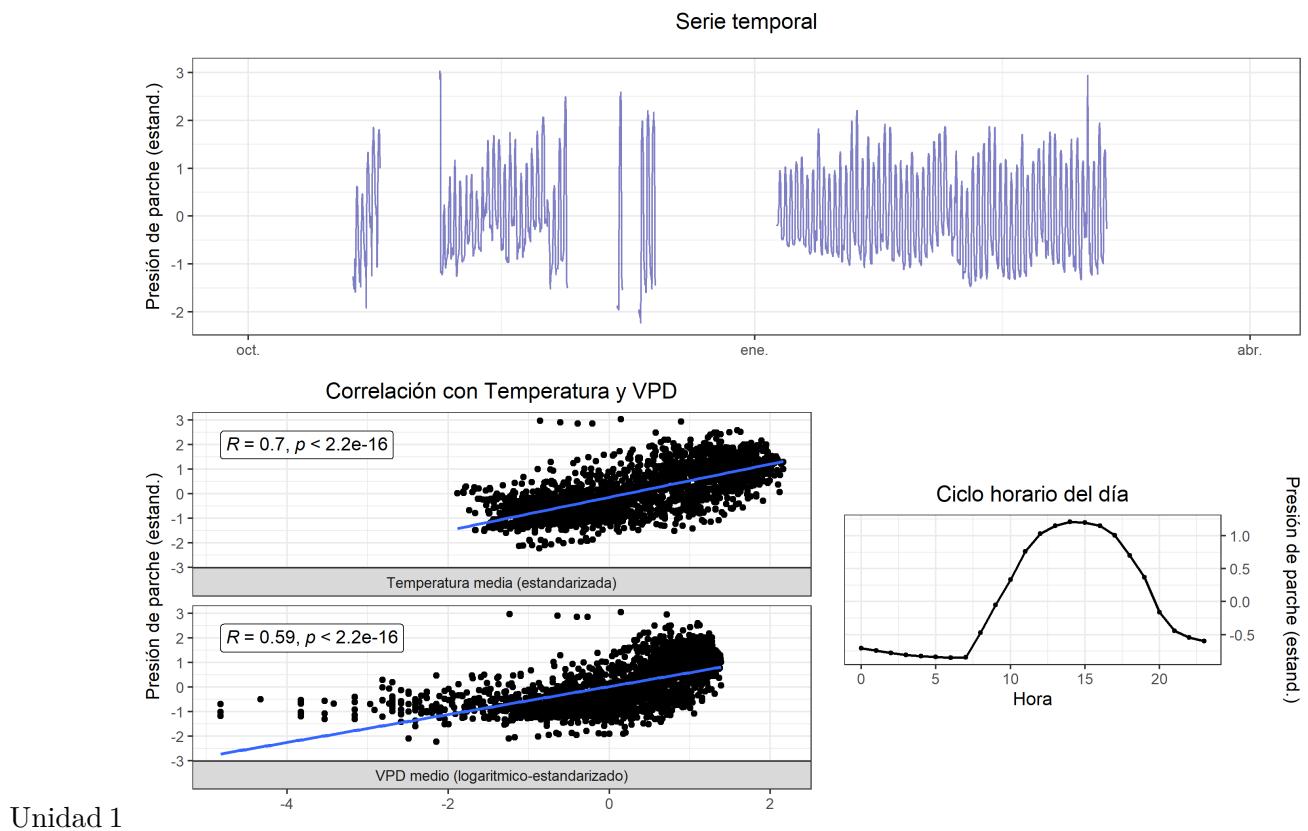
Unidad 2



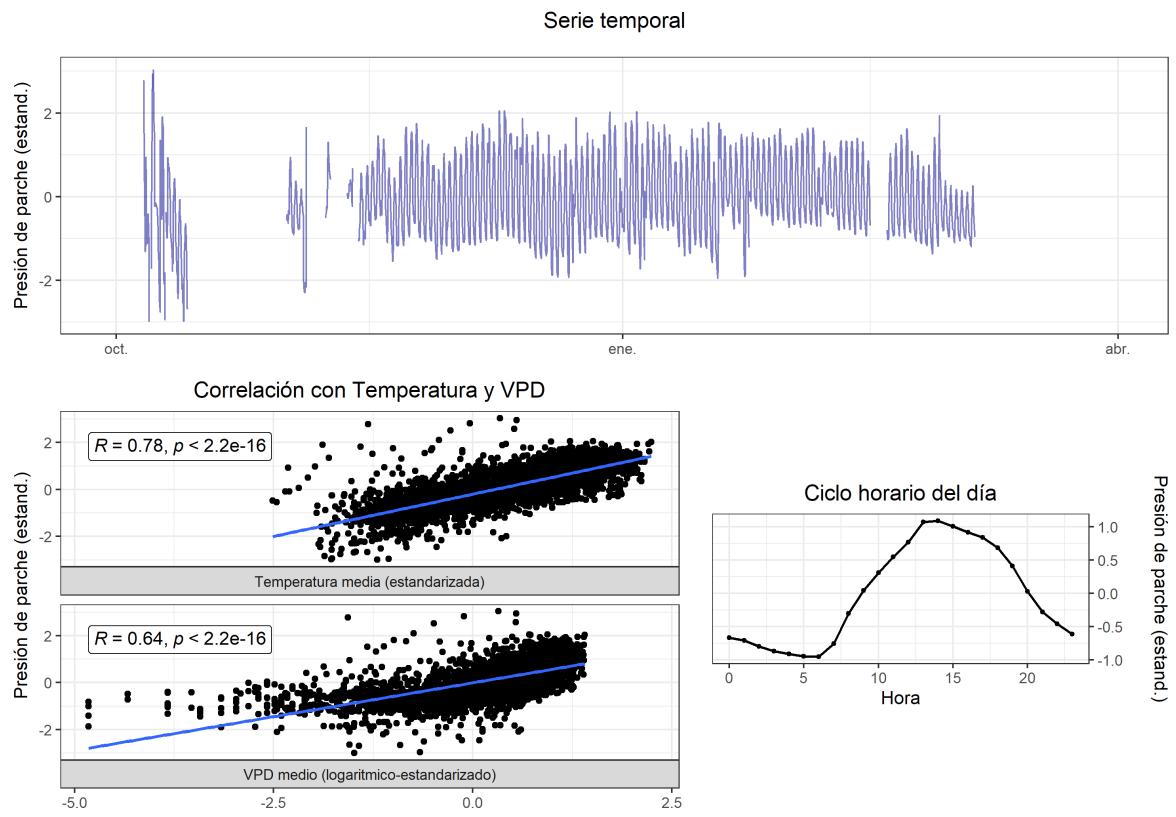


107.0.1 Rio Claro

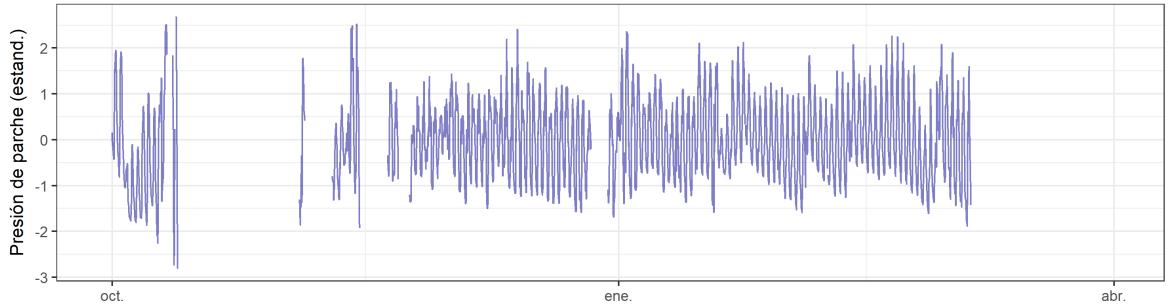
108 T1 (2022-2023)



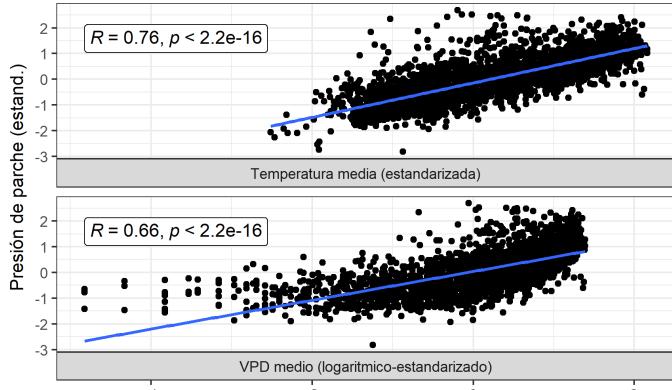
Unidad 2



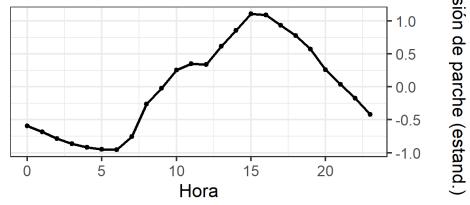
Serie temporal



Correlación con Temperatura y VPD

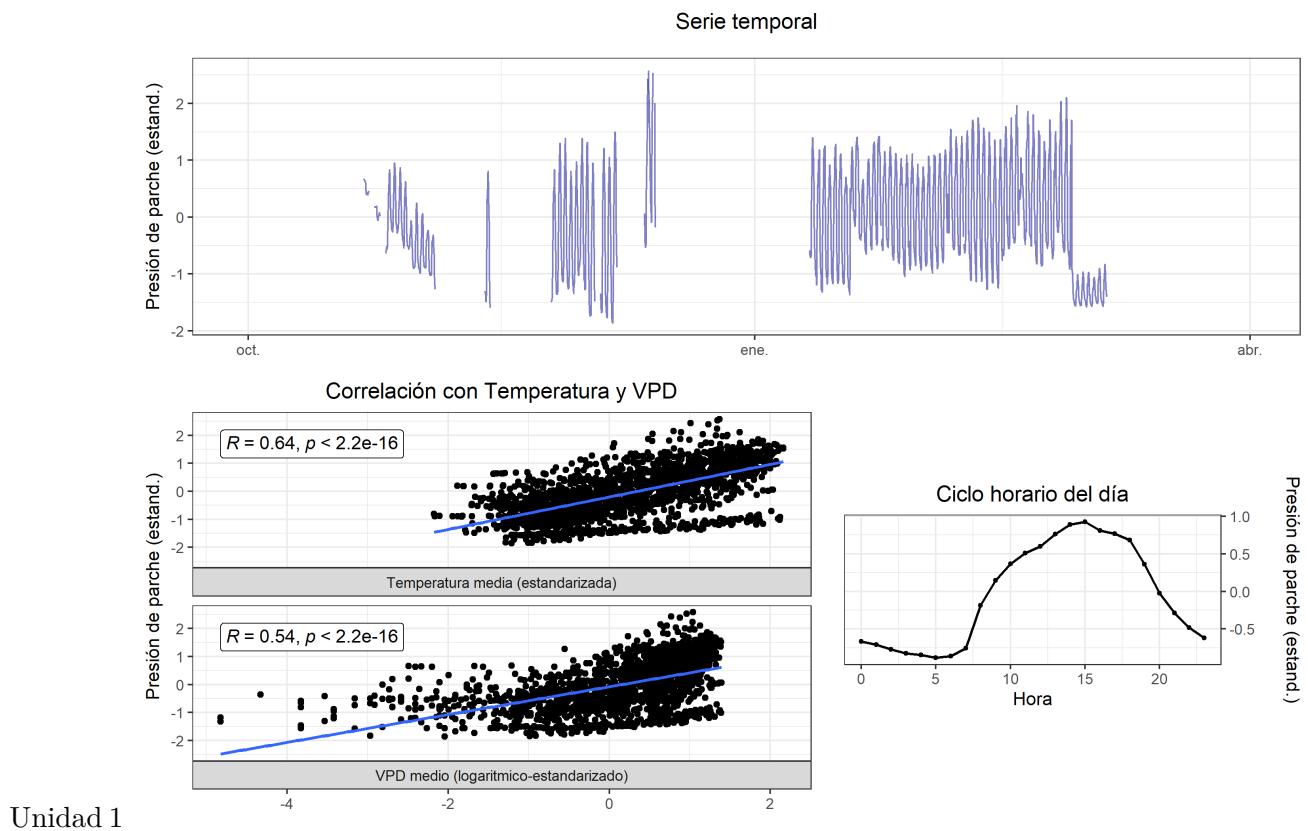


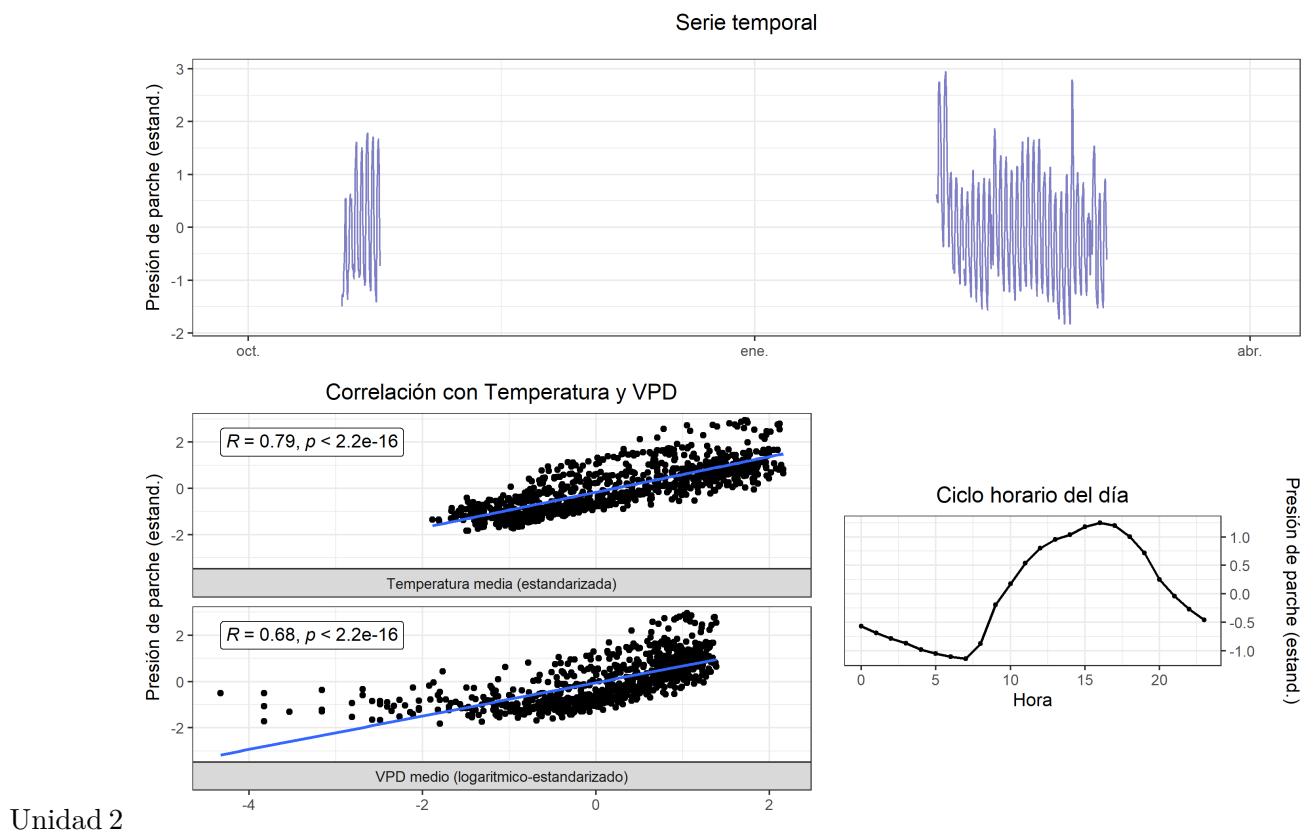
Ciclo horario del día

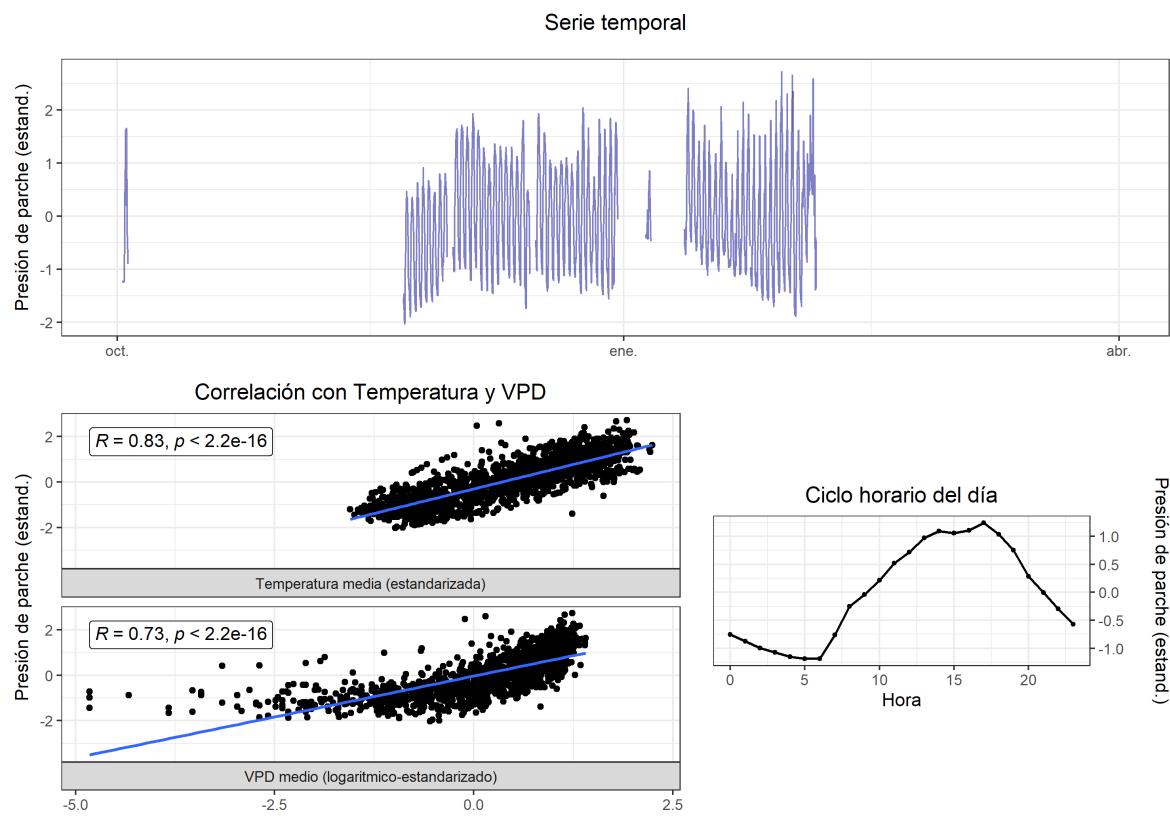


Unidad 3

109 T2 (2022-2023)

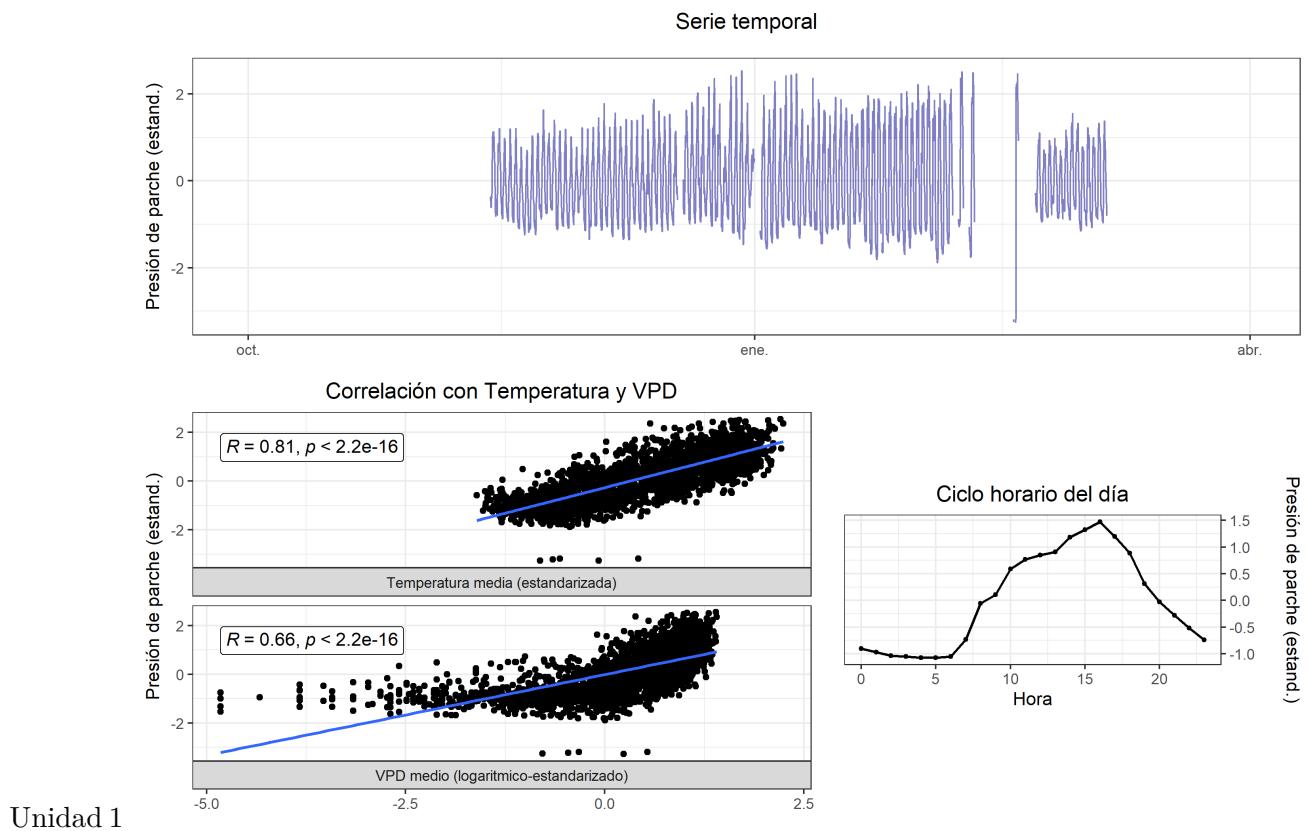


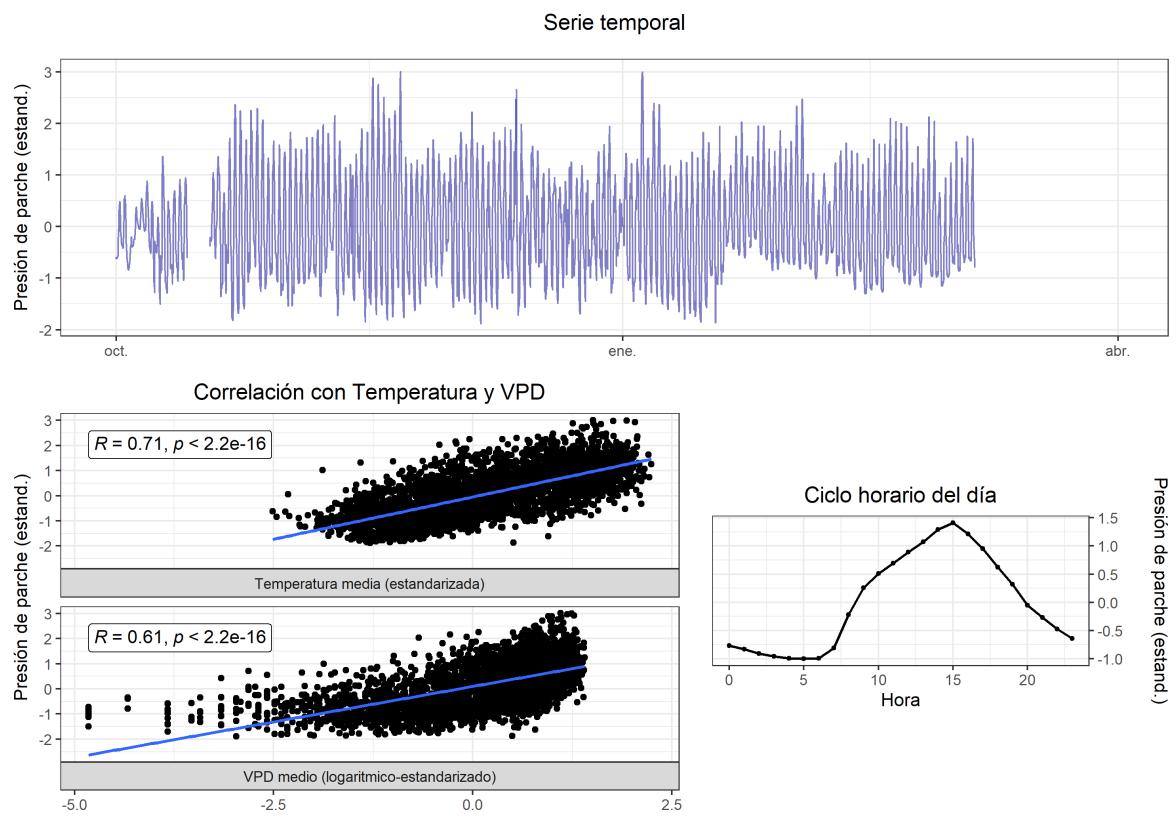




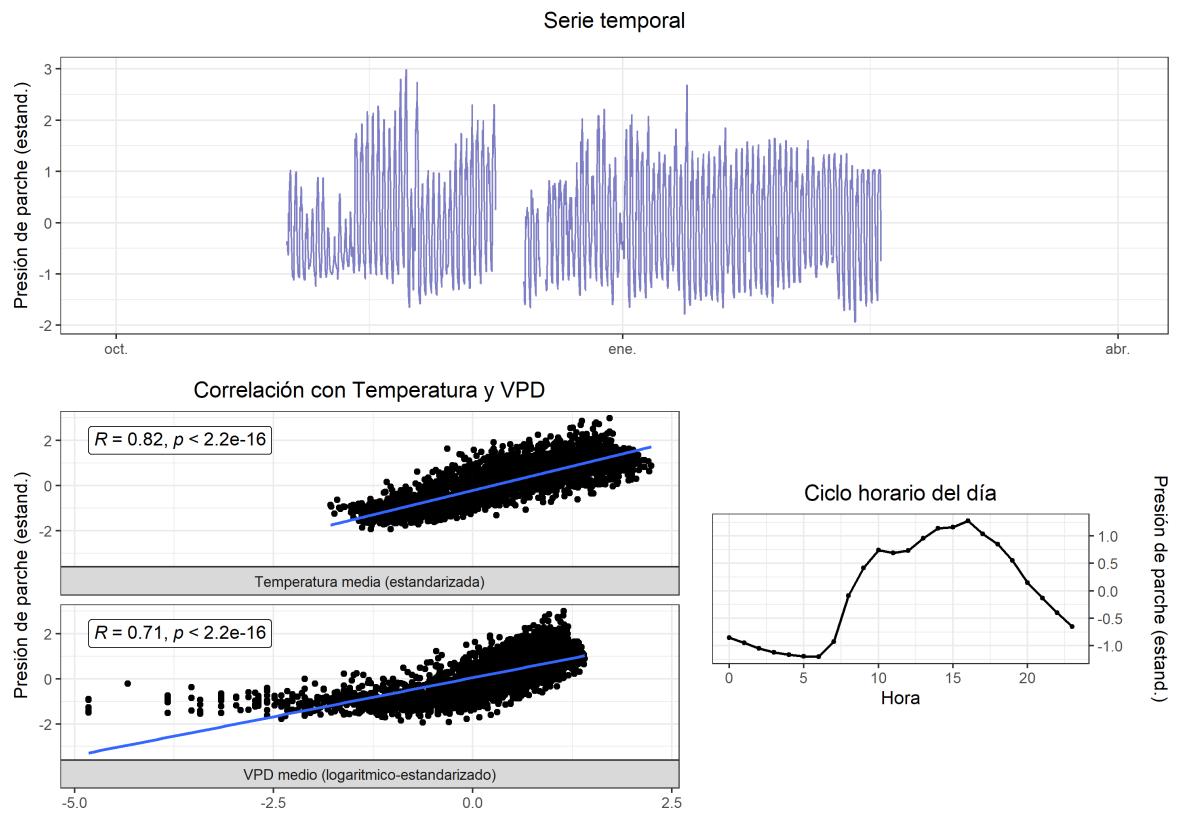
Unidad 3

110 T3 (2022-2023)



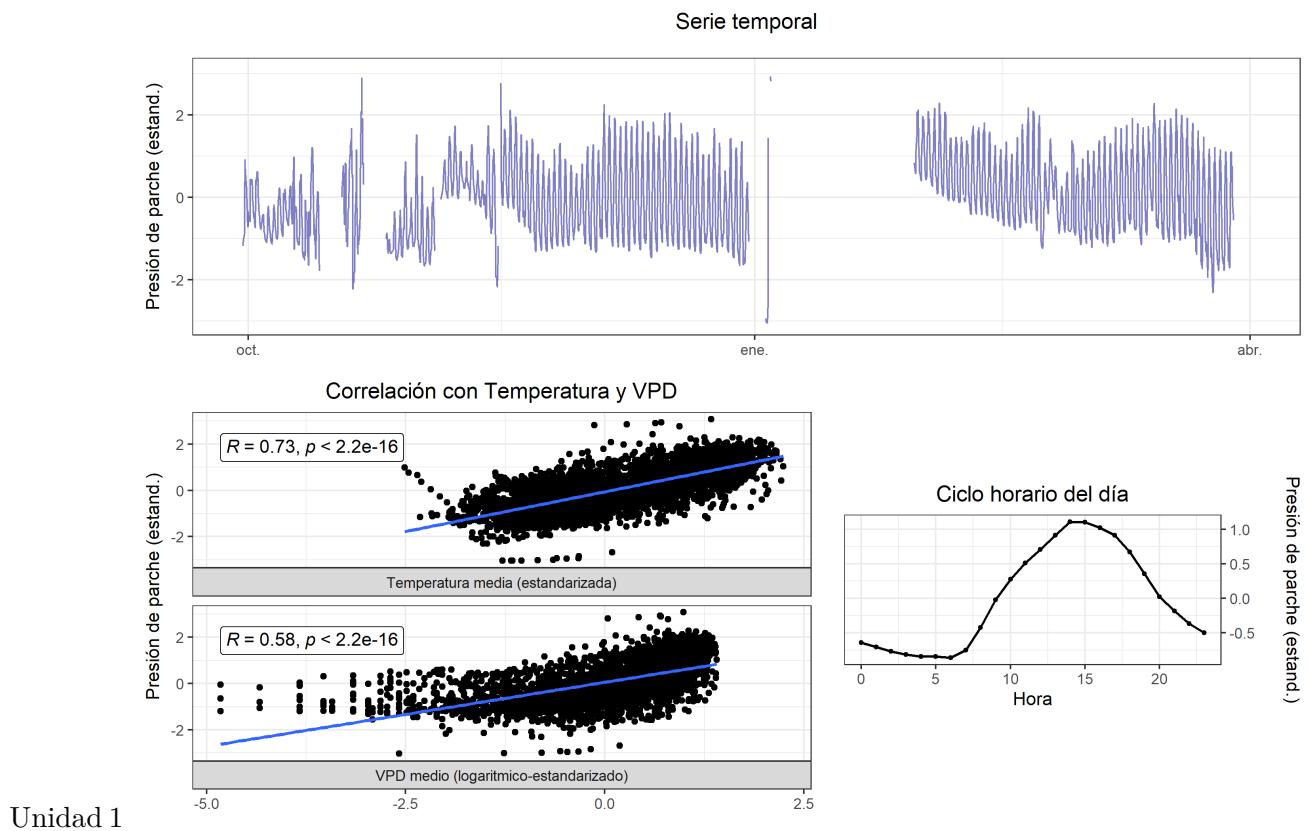


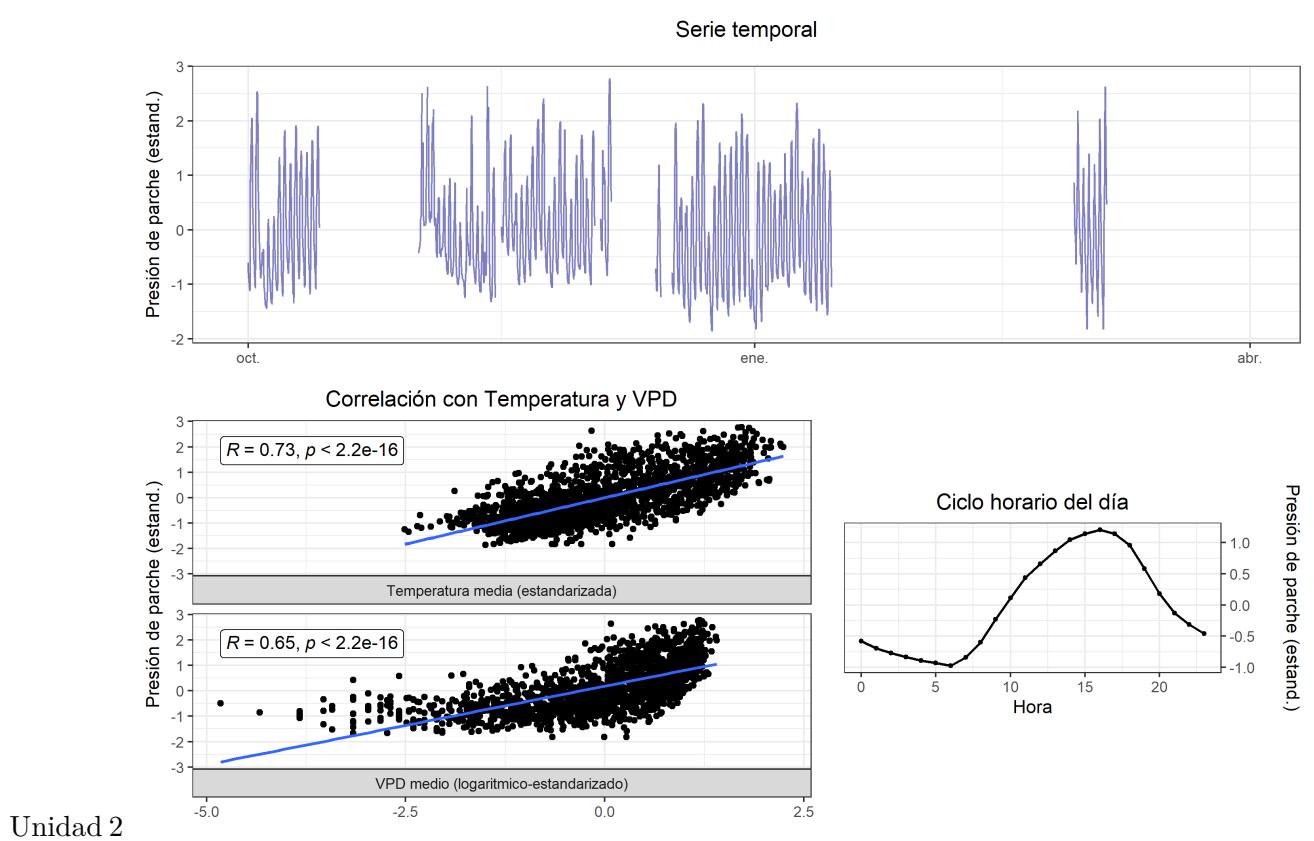
Unidad 2

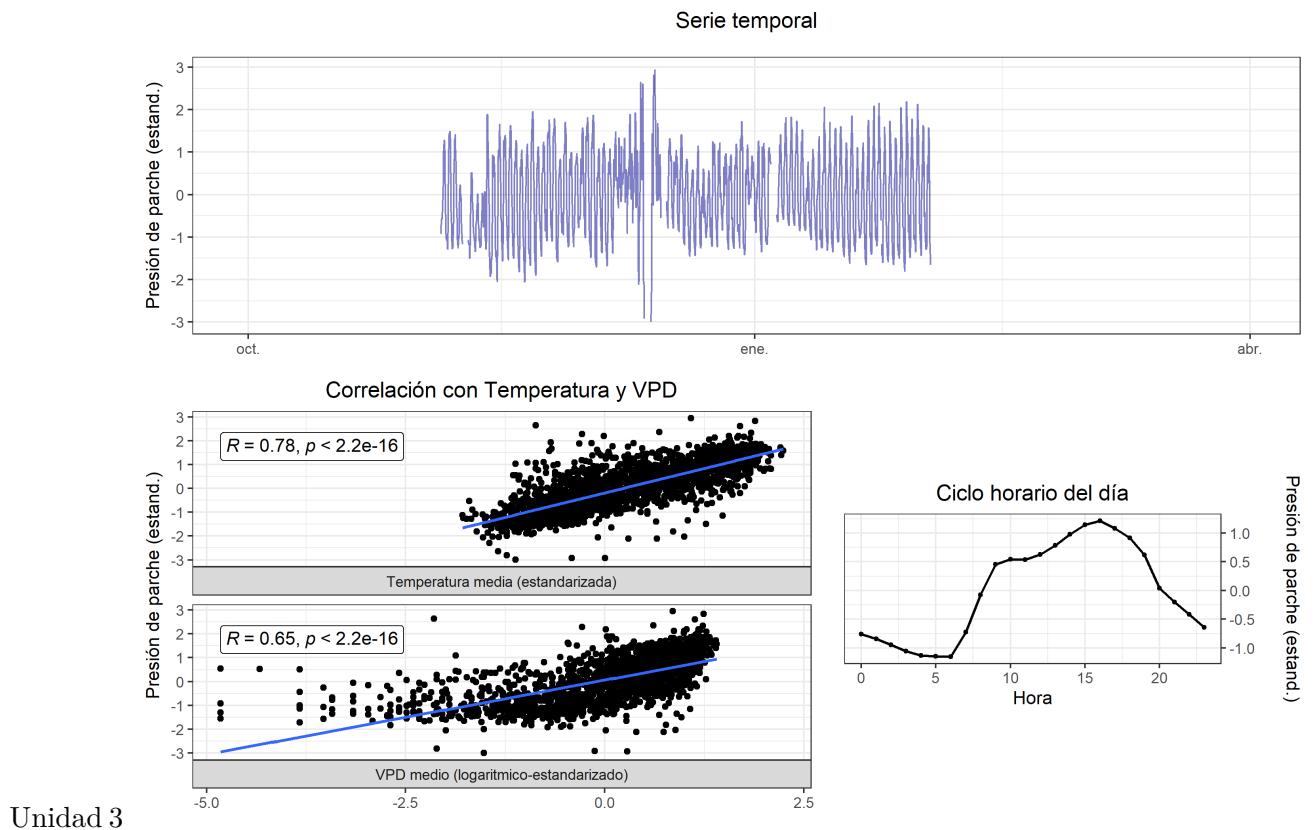


Unidad 3

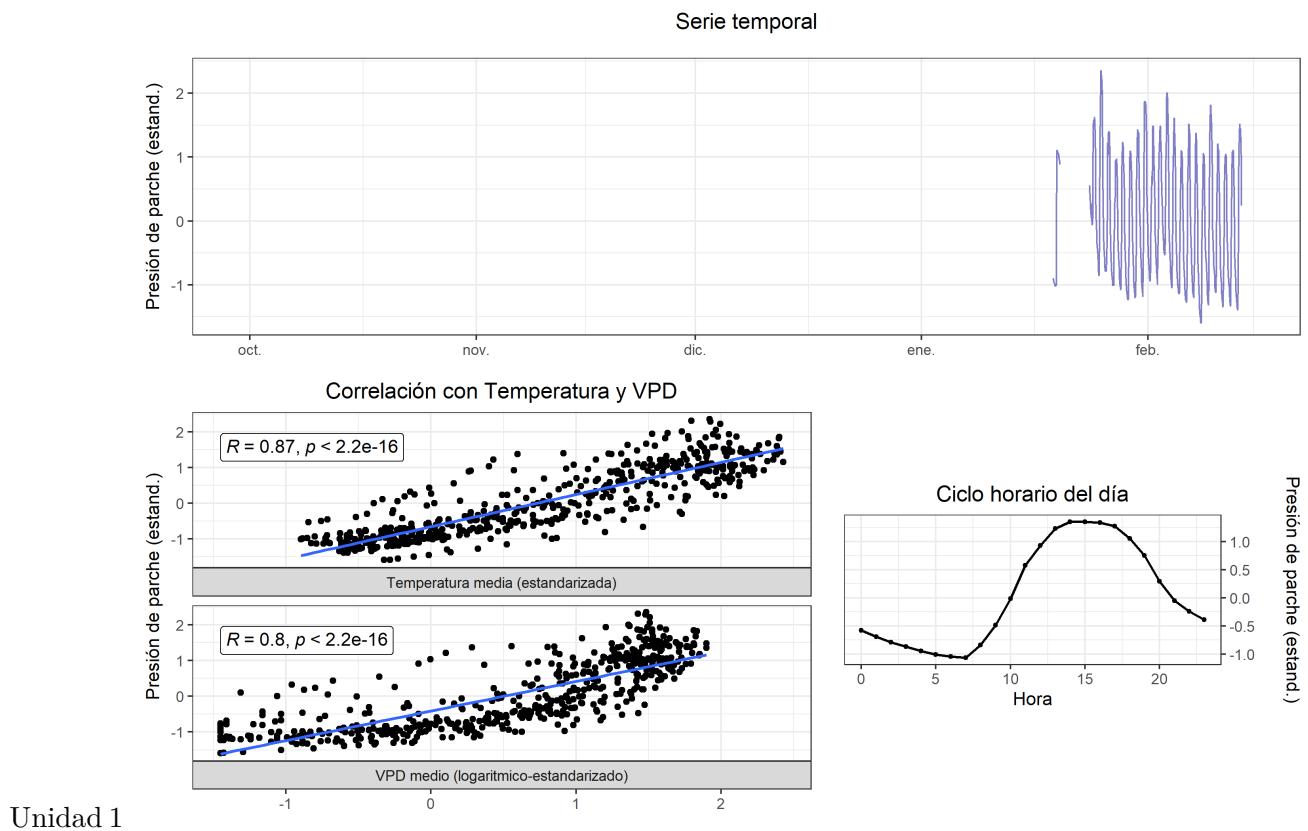
111 T4 (2022-2023)



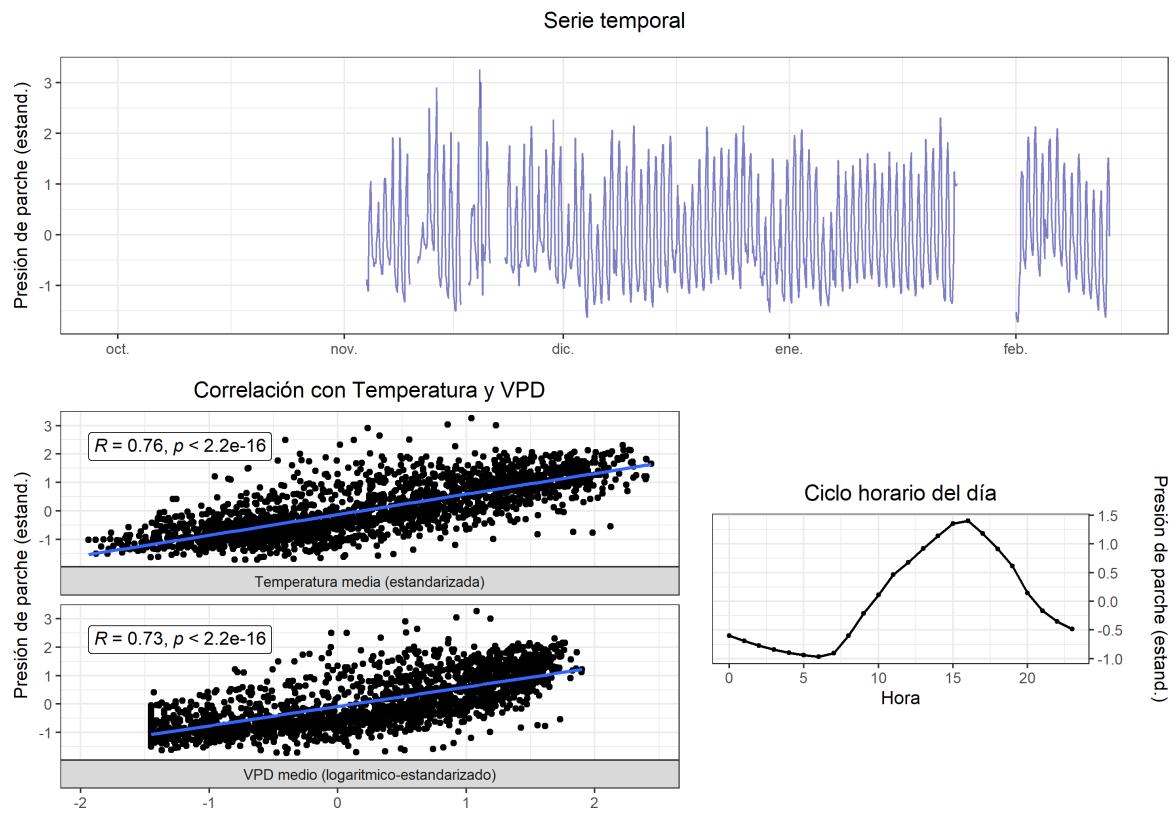




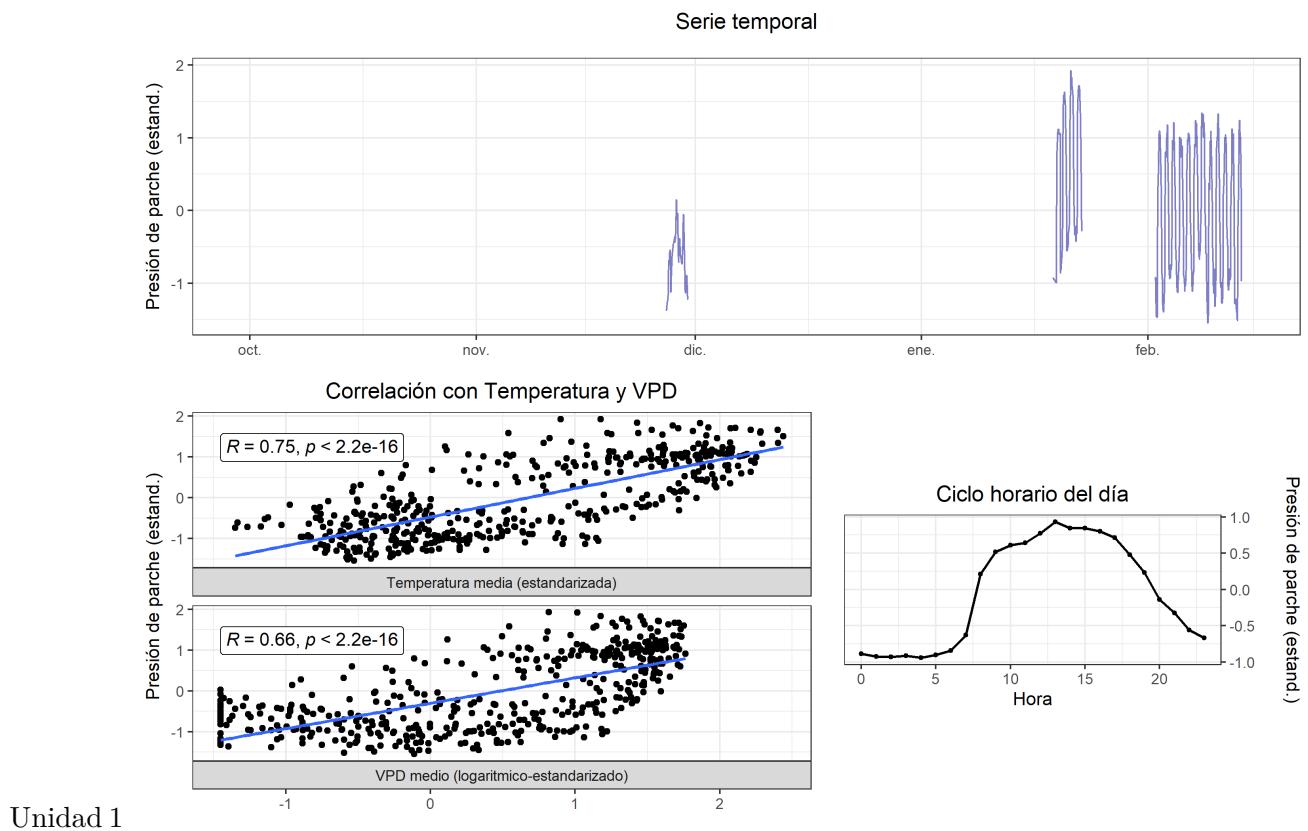
112 T1 (2023-2024)

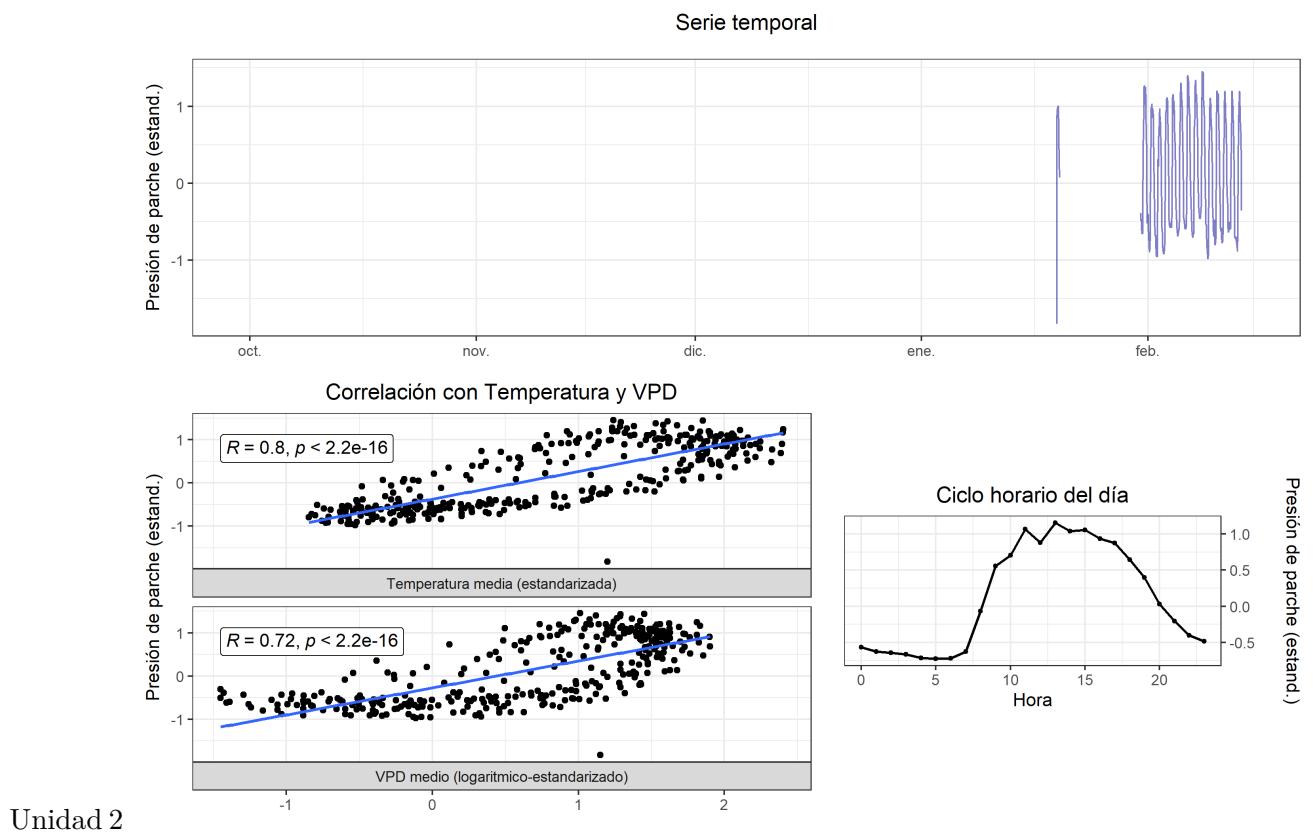


Unidad 3

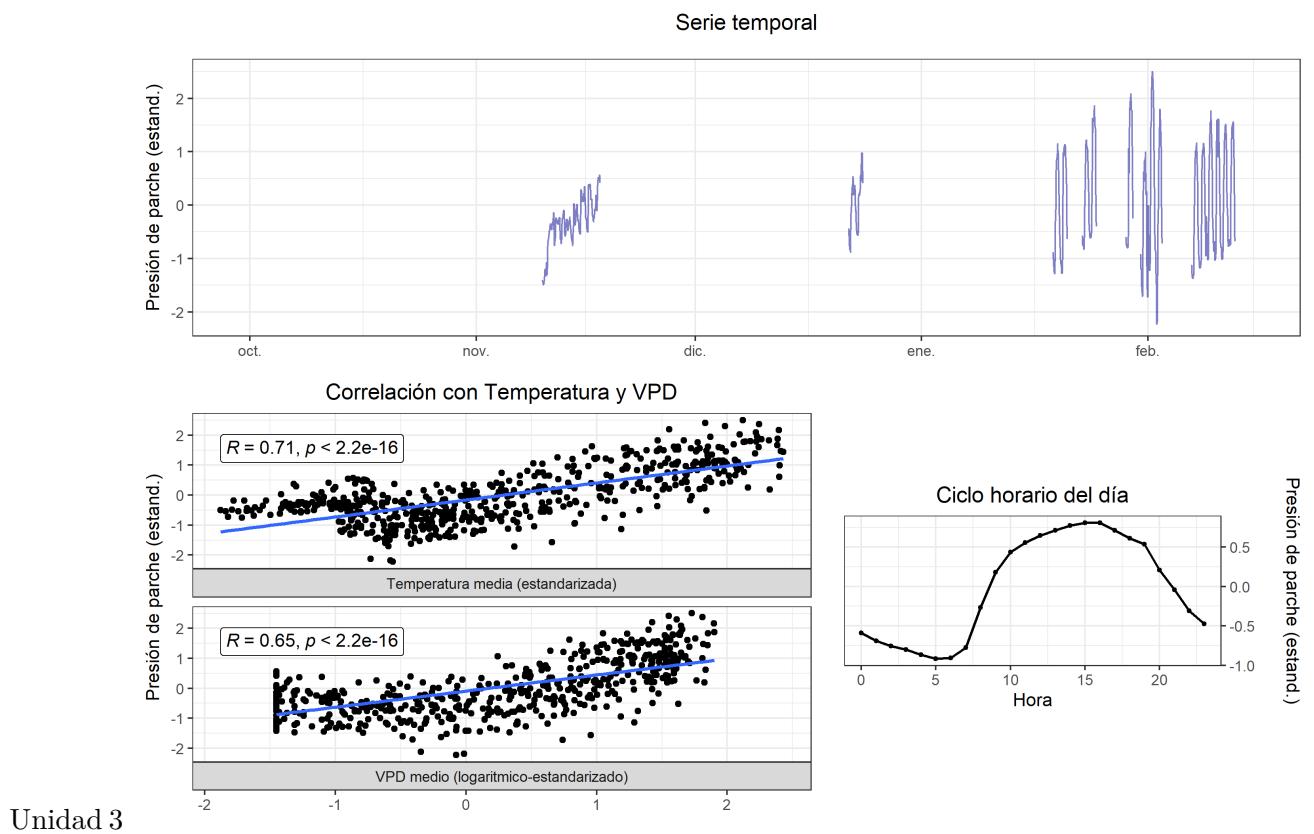


113 T2 (2023-2024)

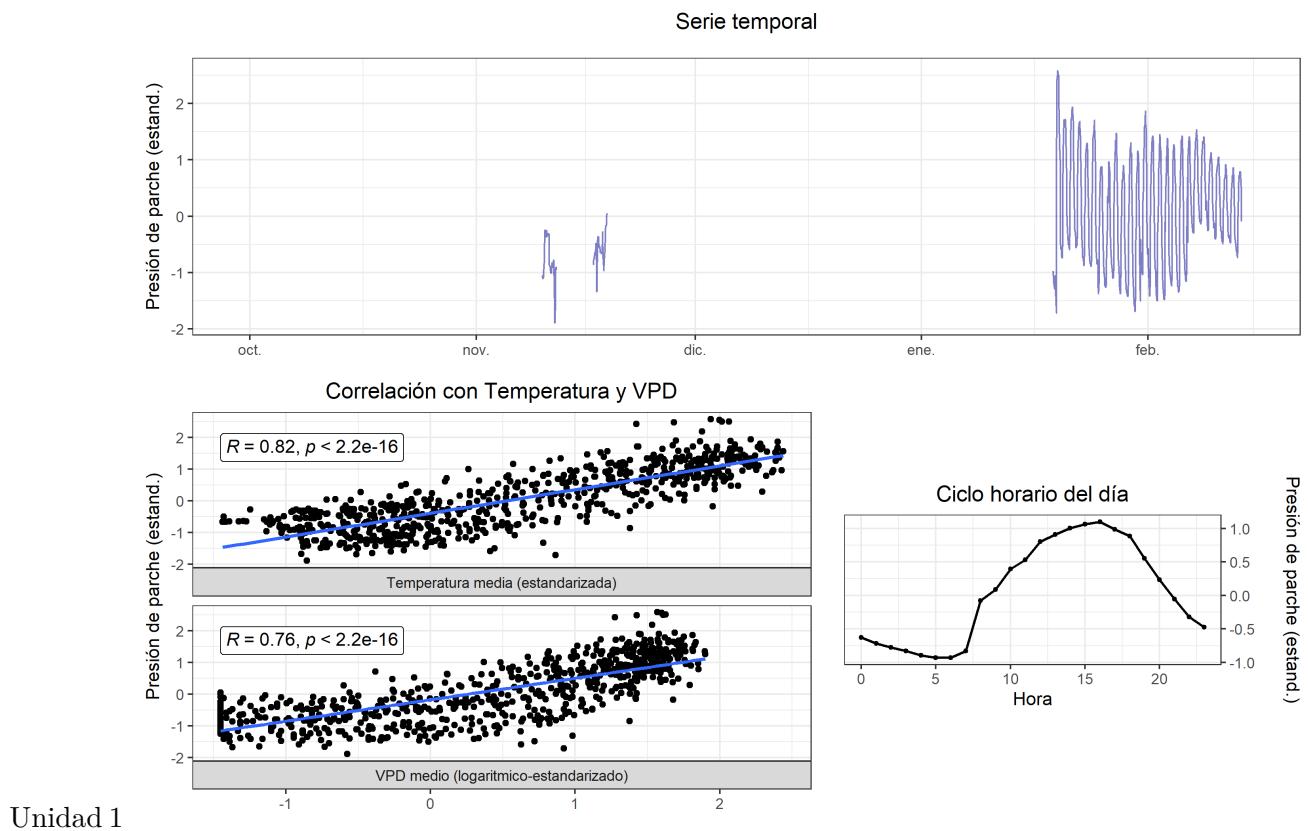


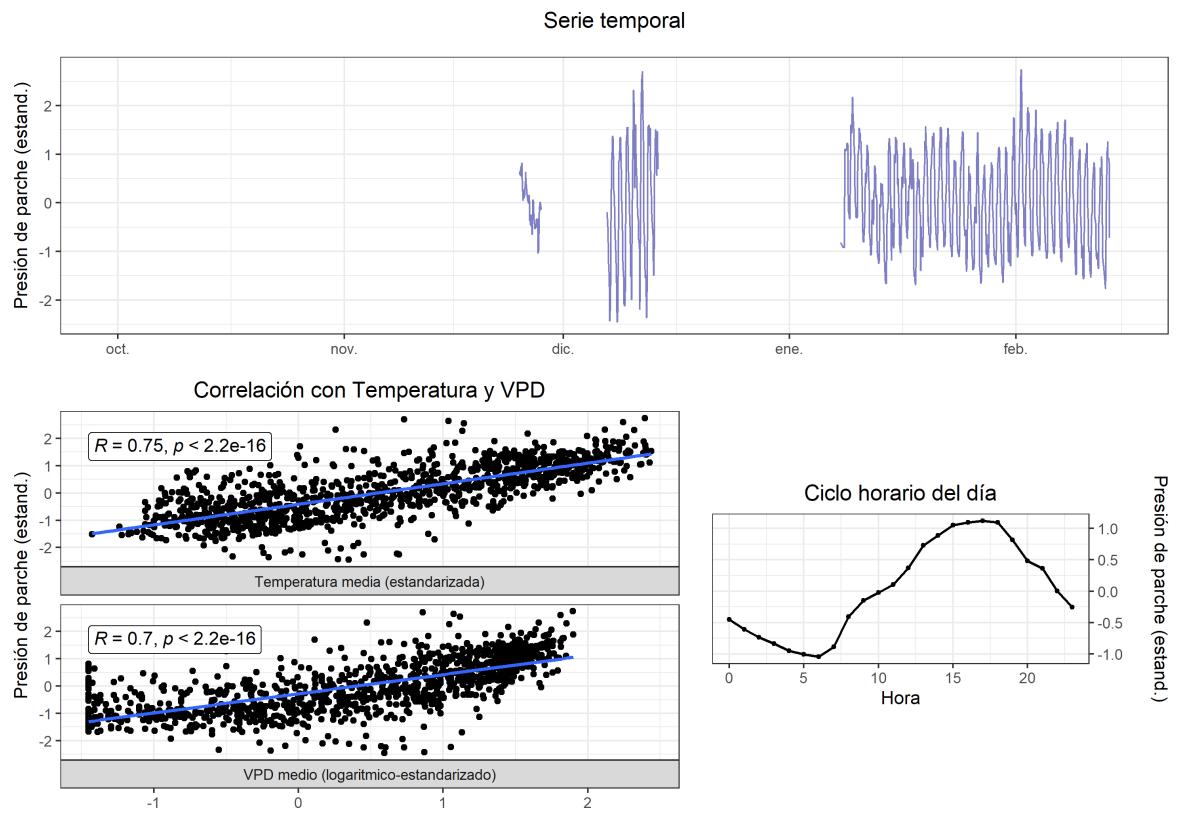


Unidad 2

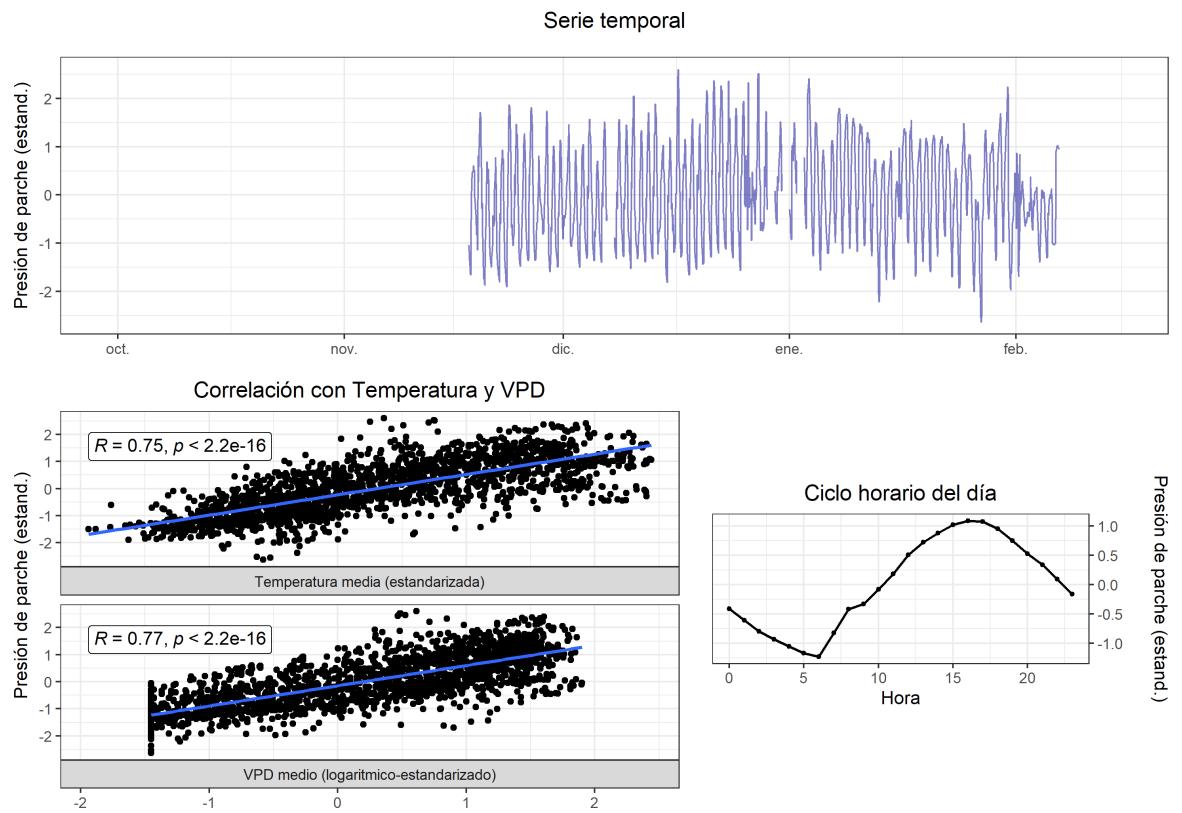


114 T3 (2023-2024)



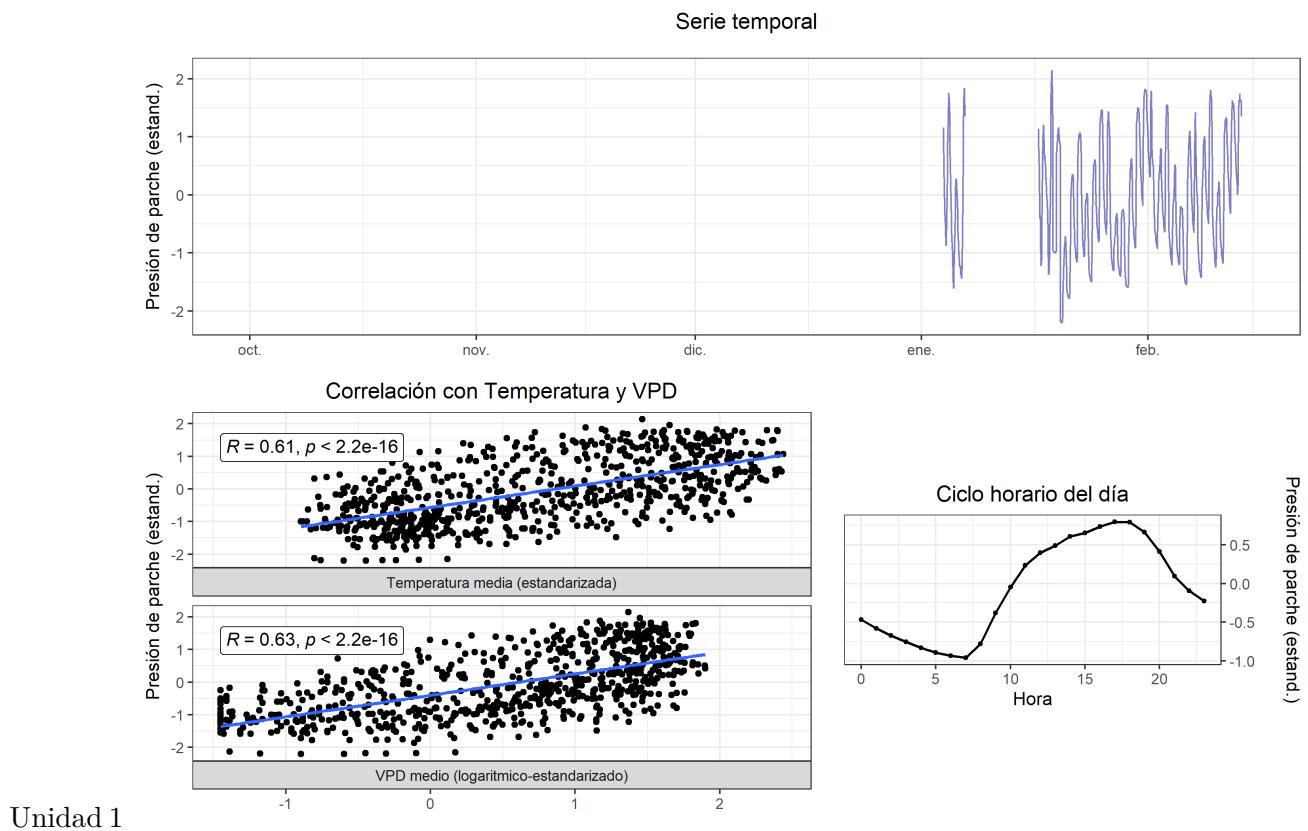


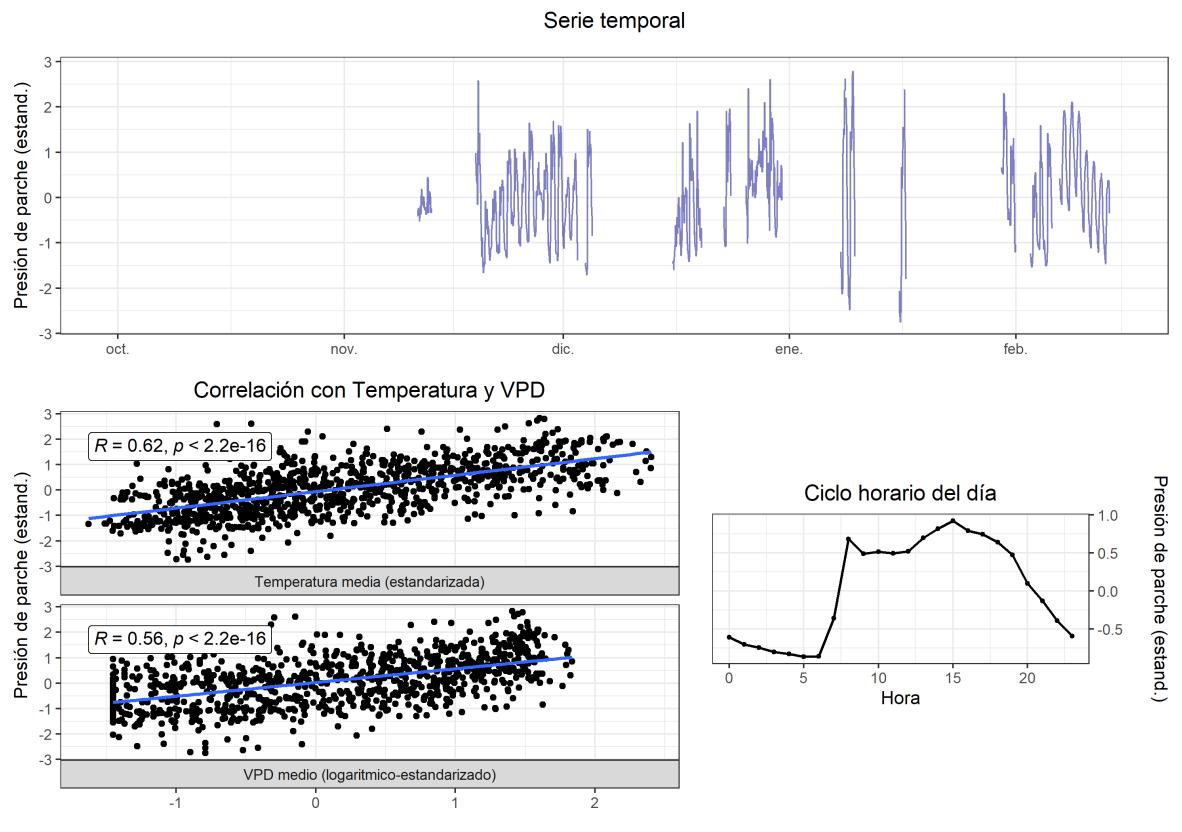
Unidad 2



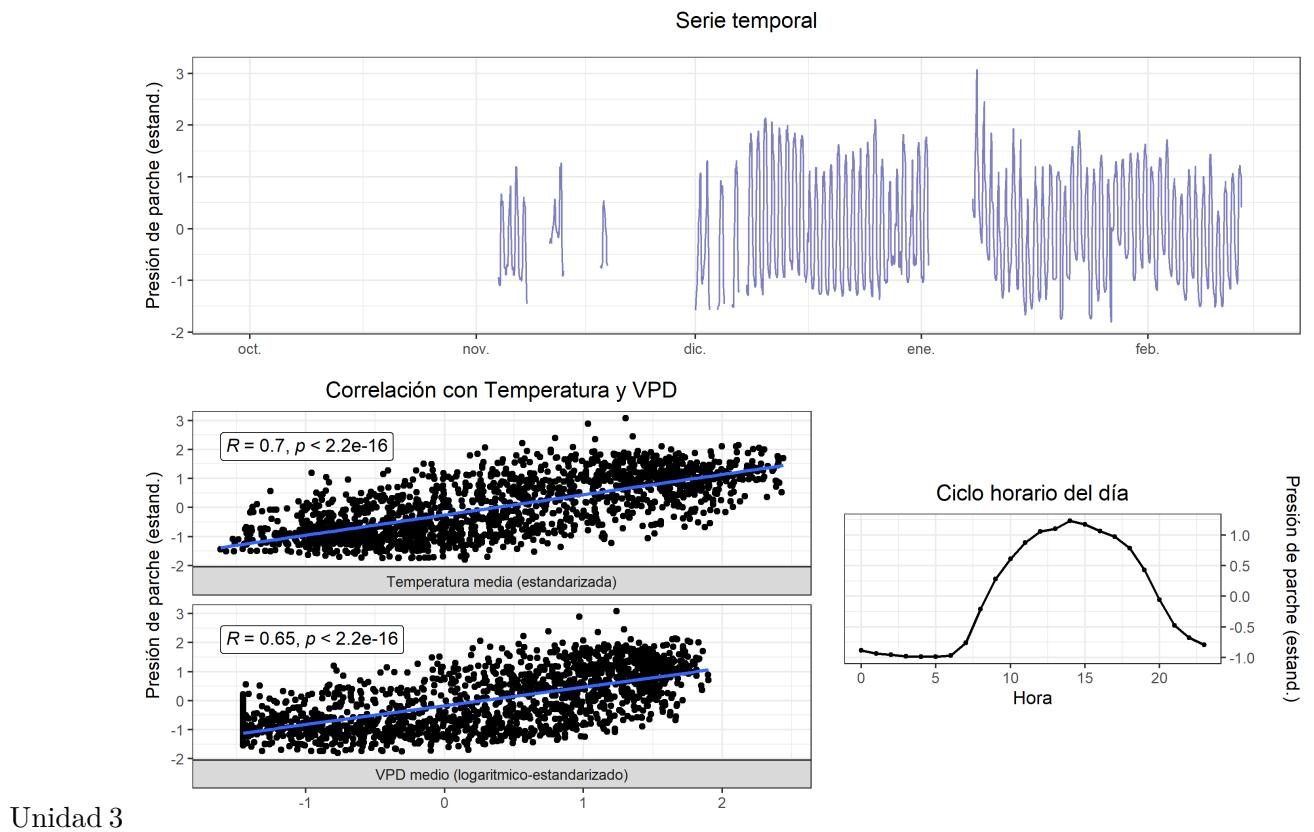
Unidad 3

115 T4 (2023-2024)





Unidad 2

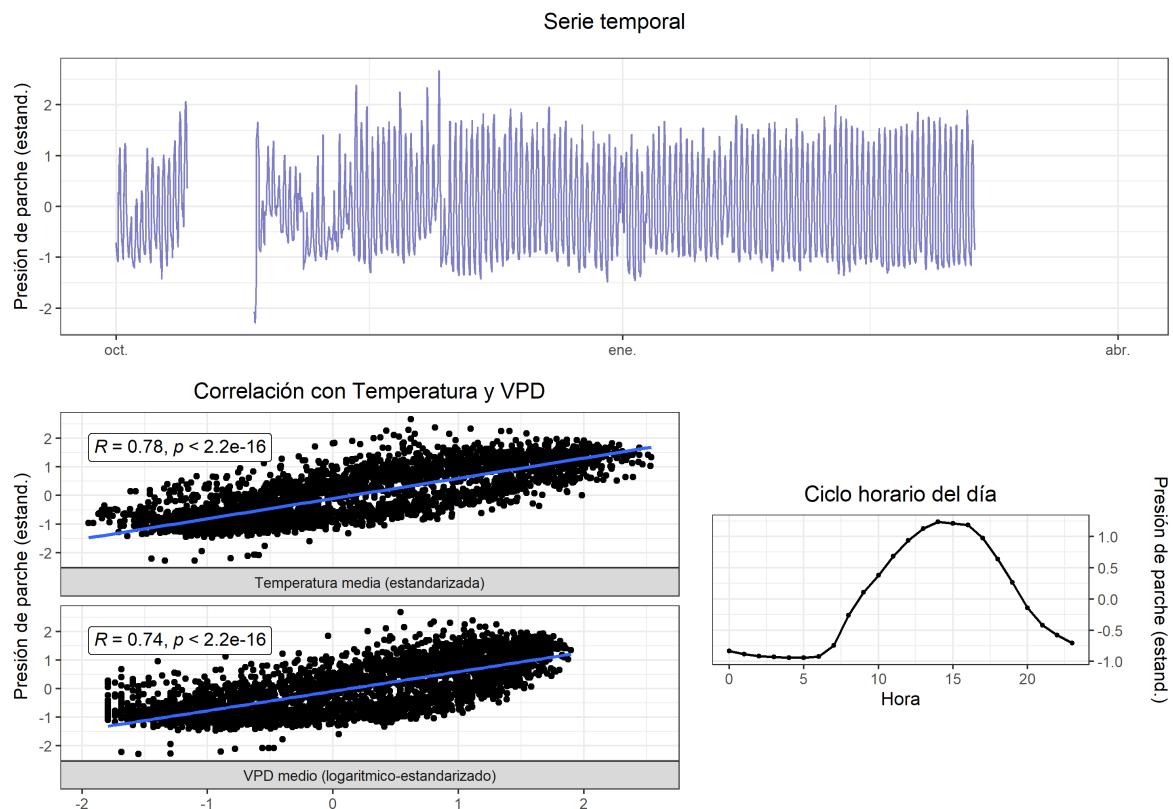


115.1 A nivel de tratamiento

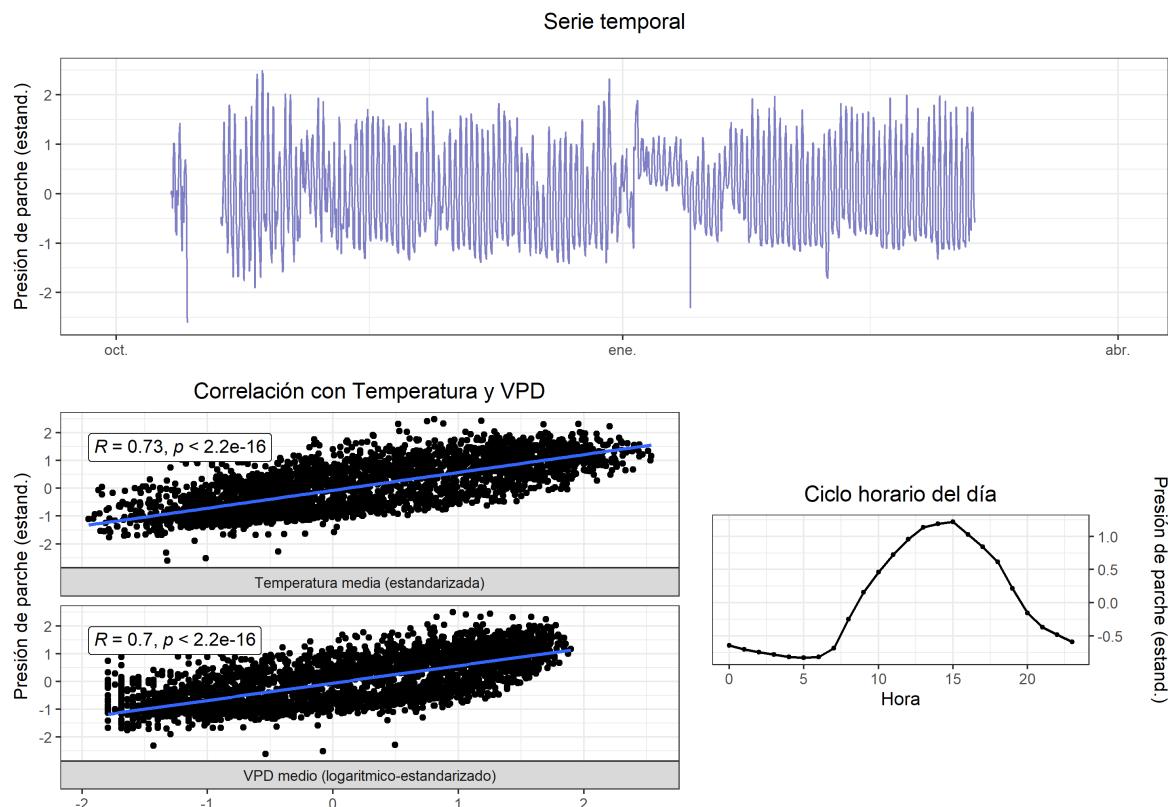
Para obtener el turgor preprocesado a nivel de tratamiento, se promediaron las series promediadas de cada unidad según tratamiento, obteniendo una serie única para cada tratamiento de en ambos sitios.

115.1.1 La Esperanza

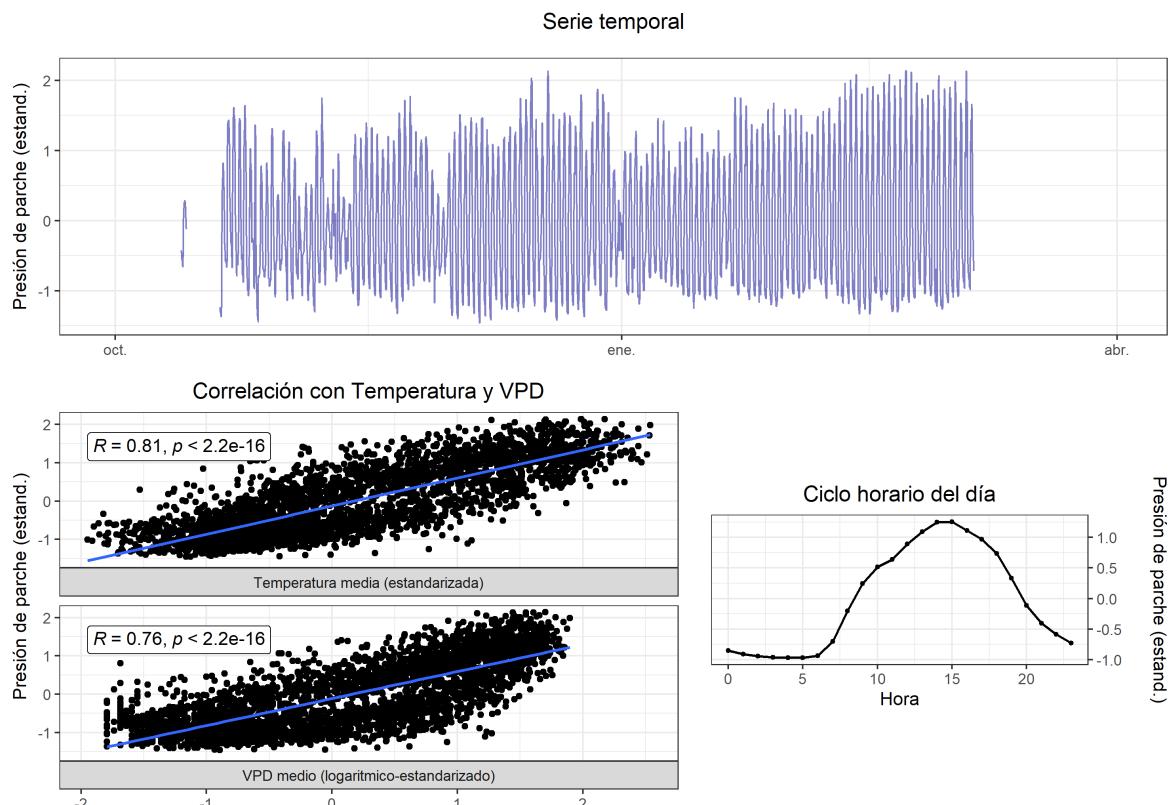
116 T1 (2022-2023)



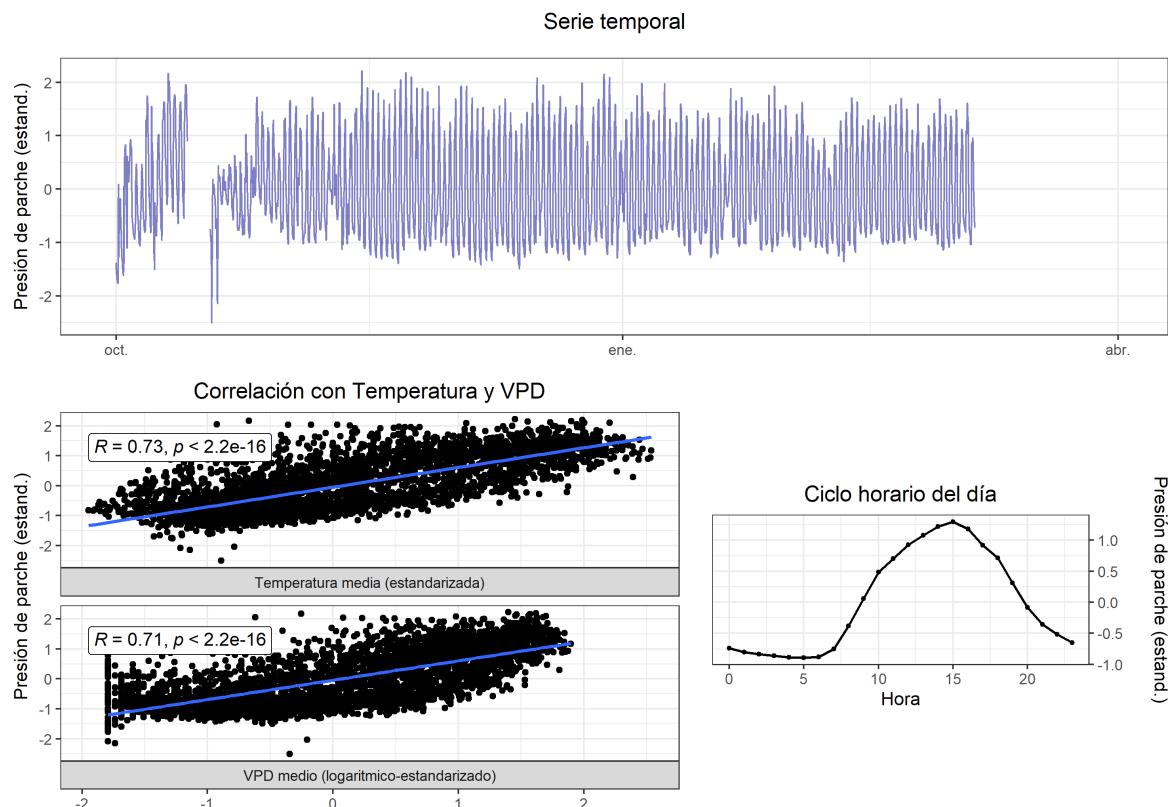
117 T2 (2022-2023)



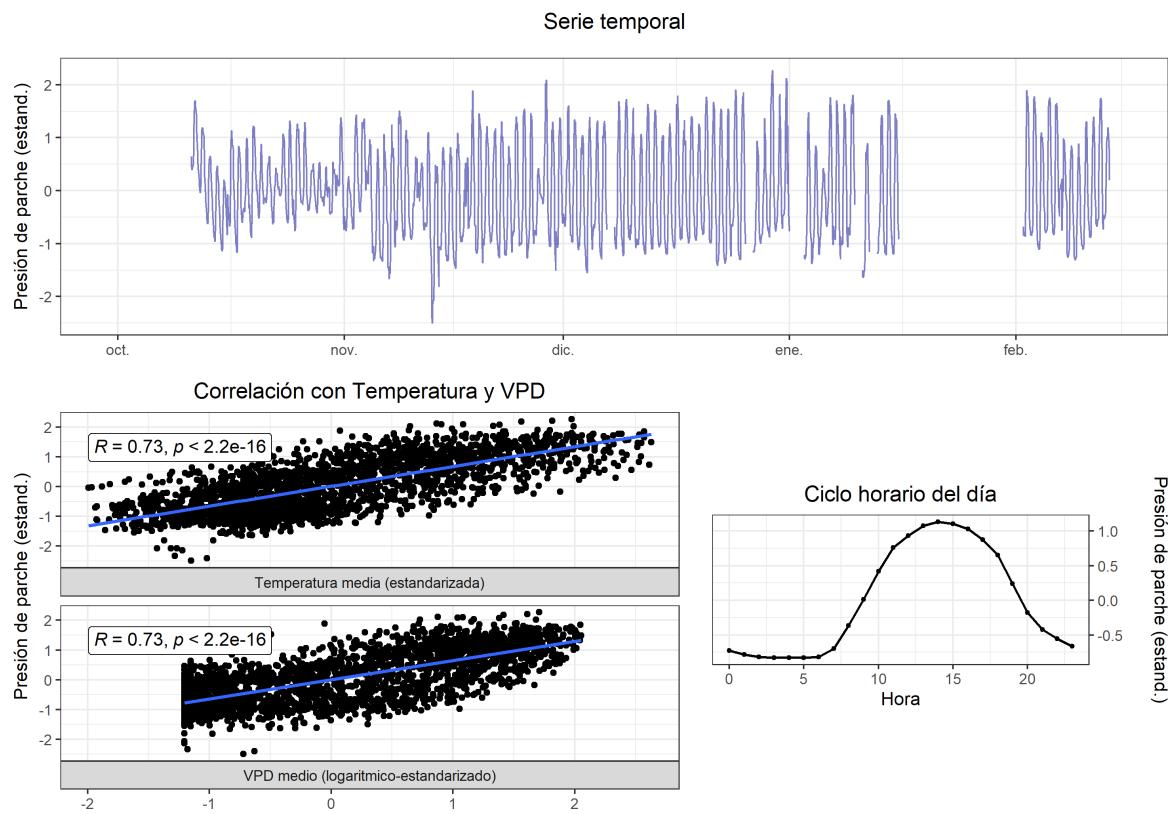
118 T3 (2022-2023)



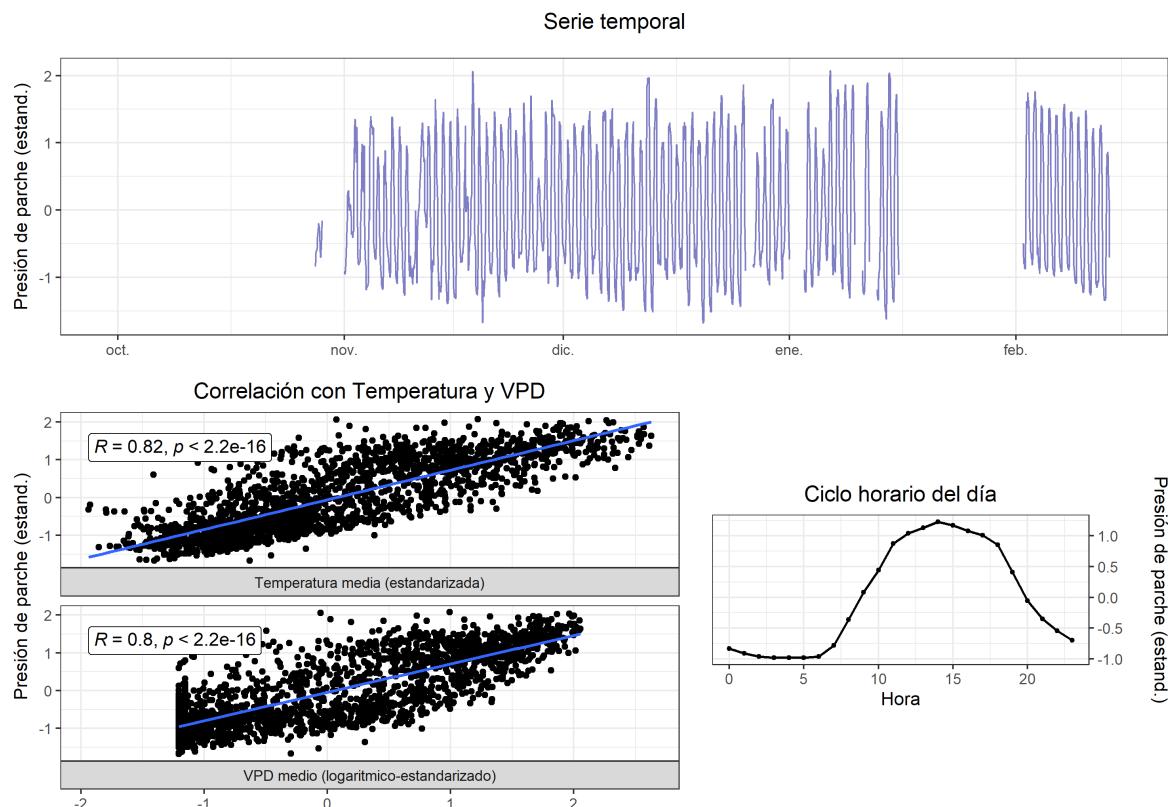
119 T4 (2022-2023)



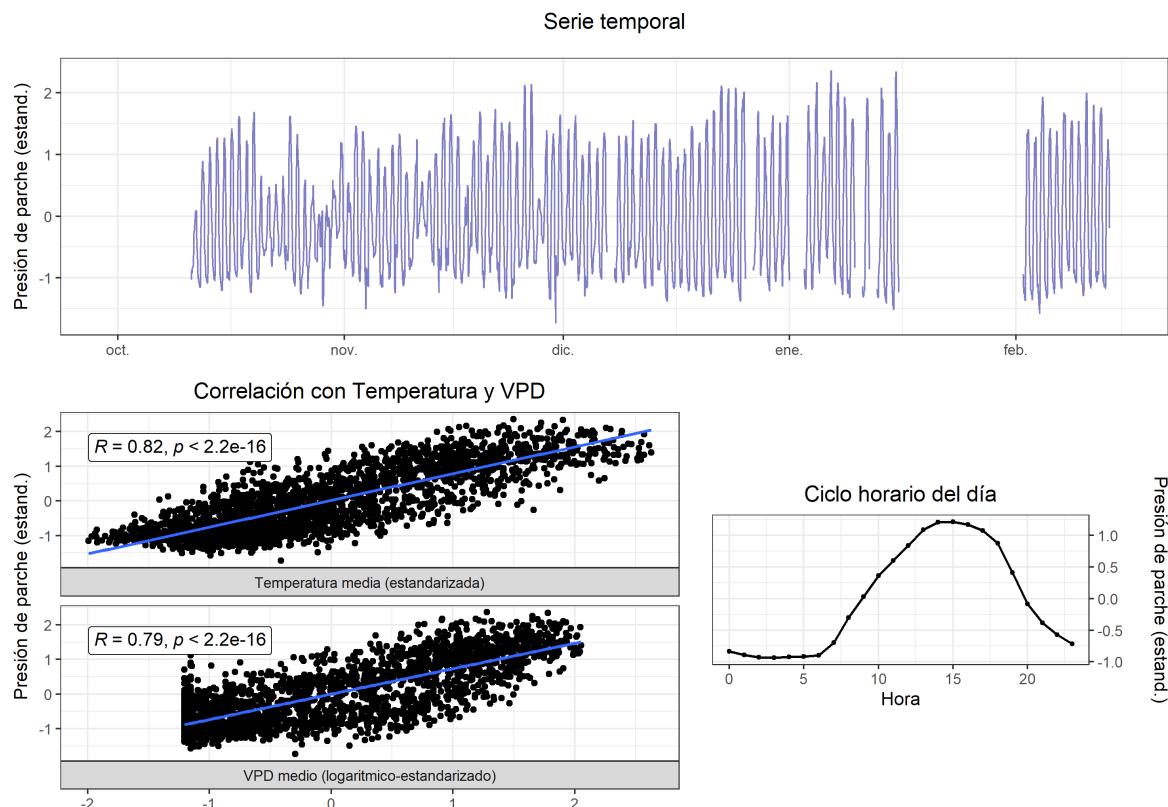
120 T1 (2023-2024)



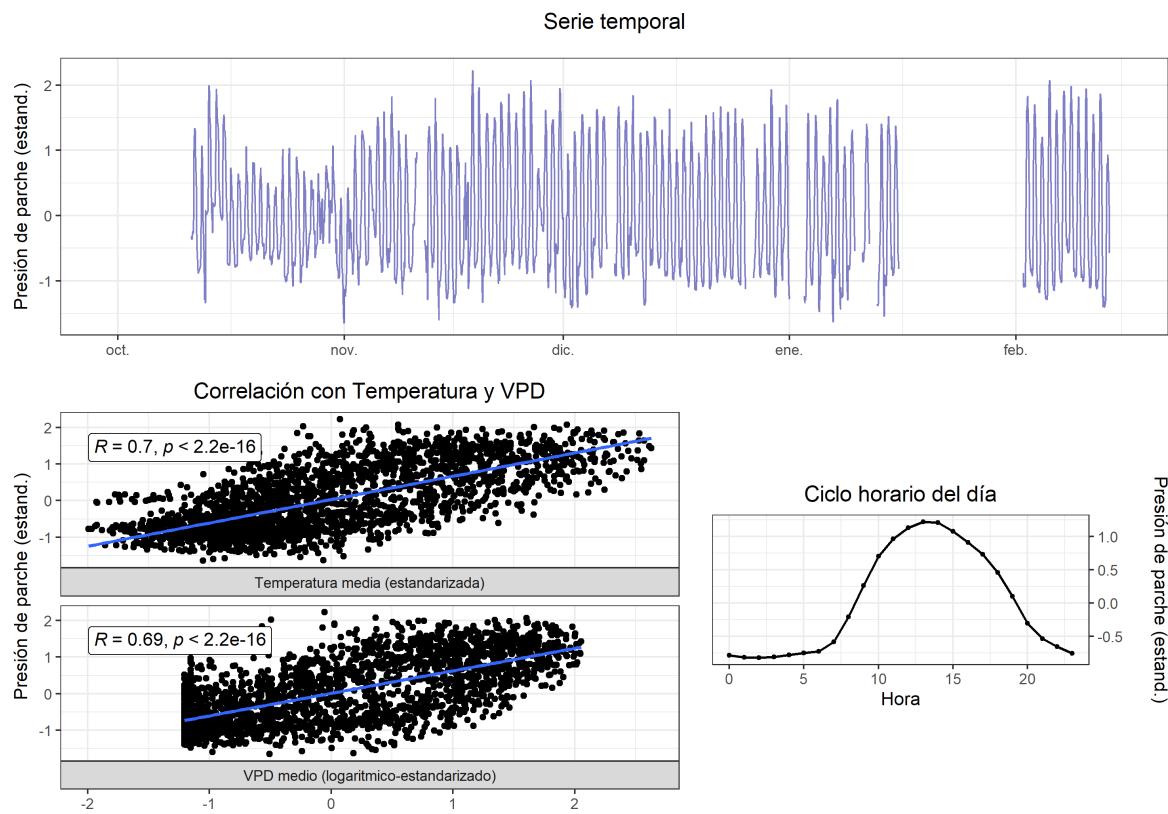
121 T2 (2023-2024)



122 T3 (2023-2024)

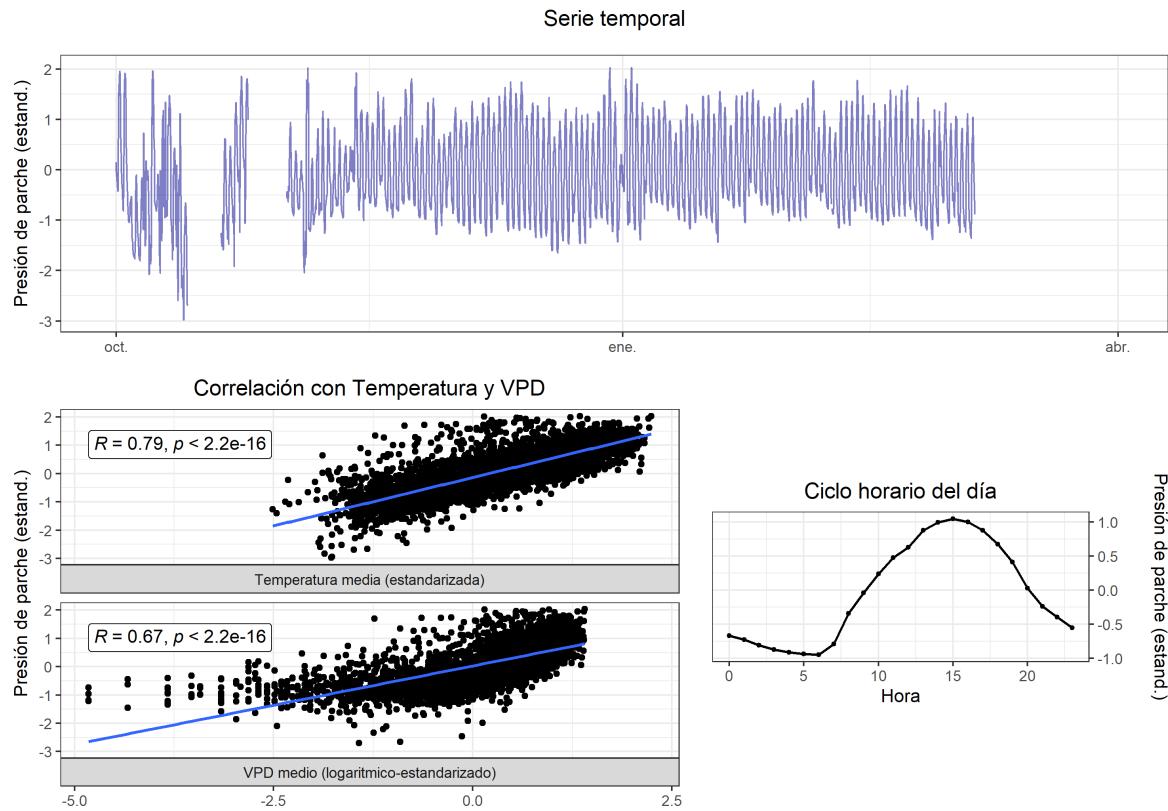


123 T4 (2023-2024)

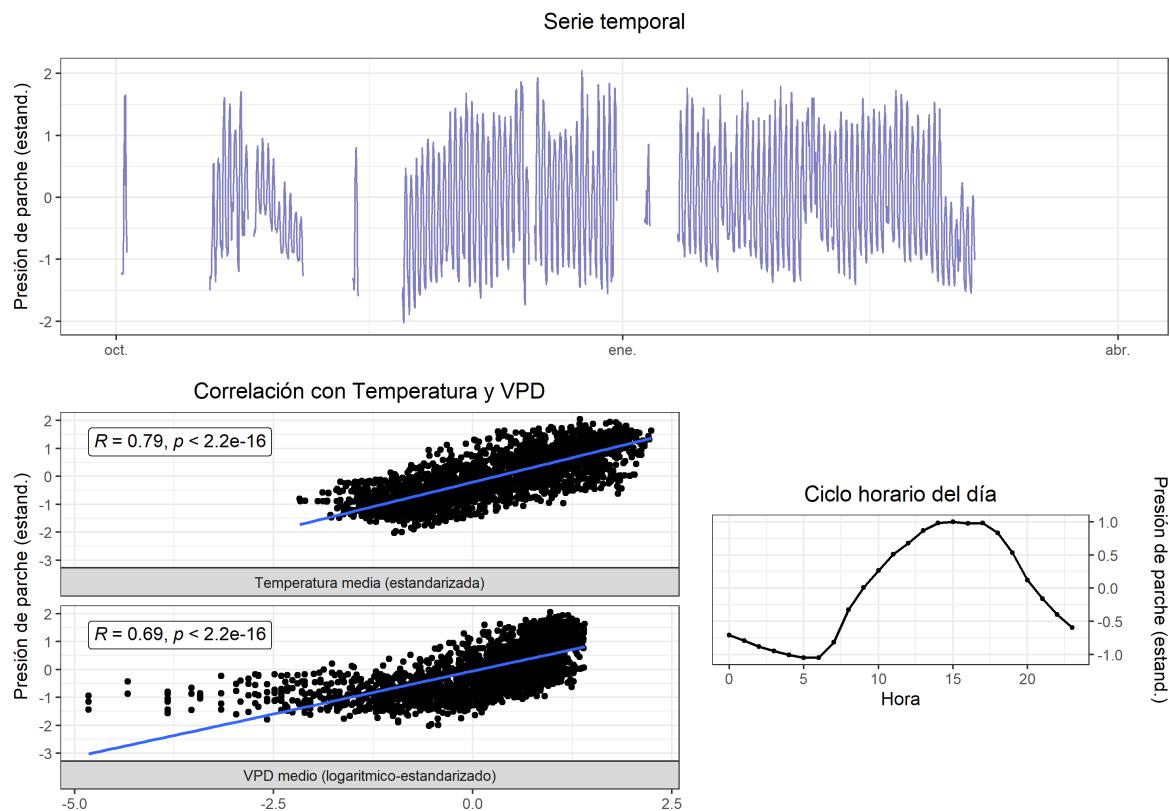


123.0.0.1 Rio Claro

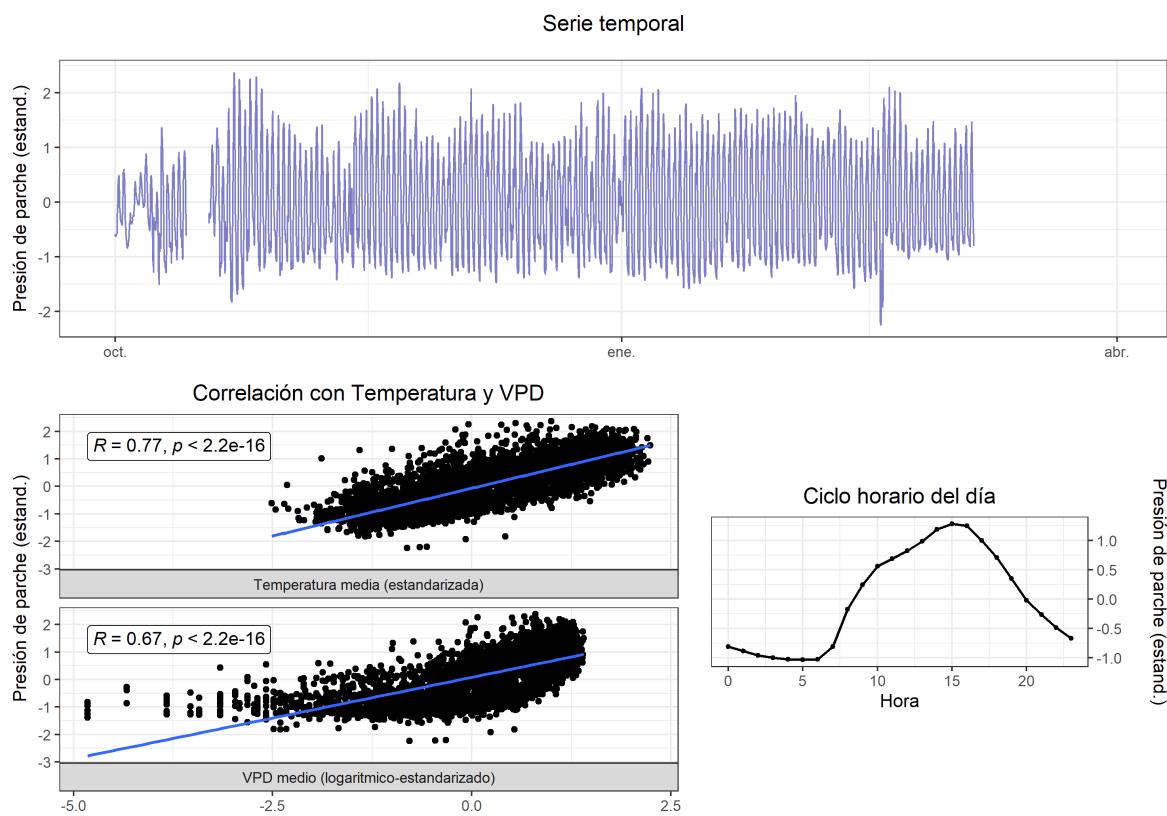
124 T1 (2022-2023)



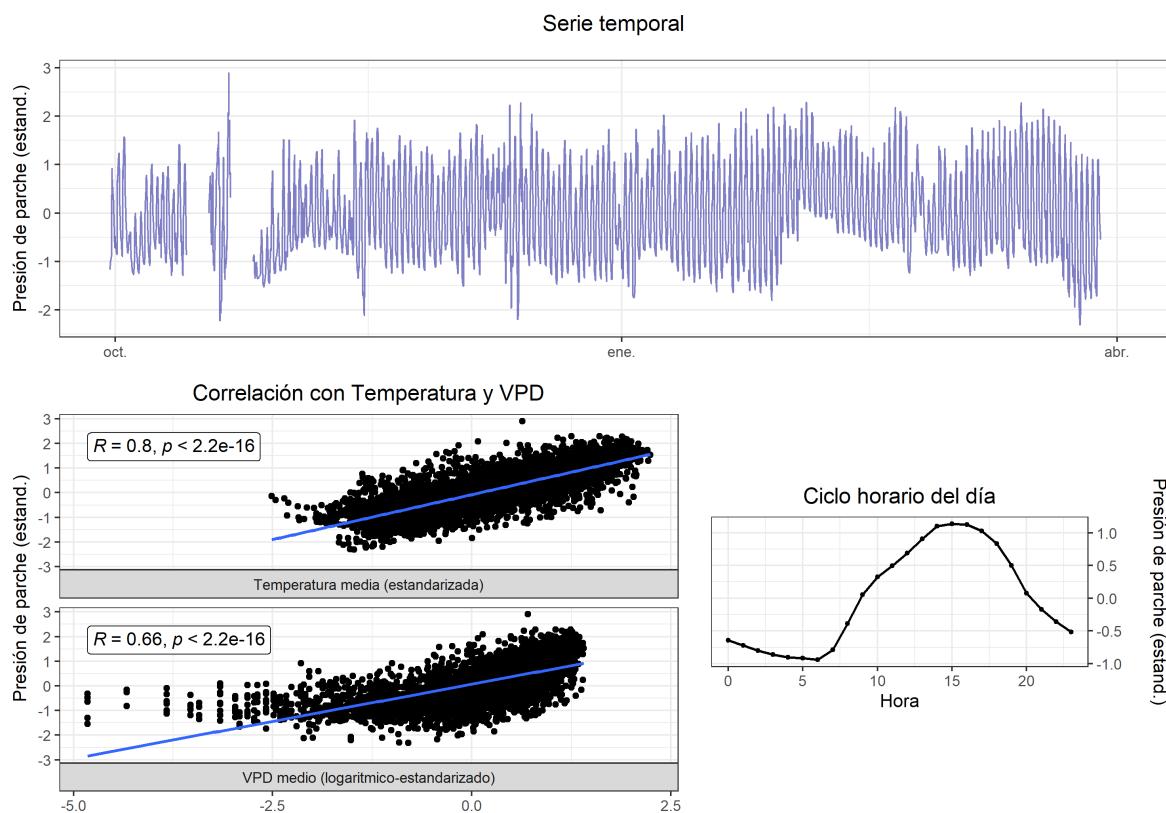
125 T2 (2022-2023)



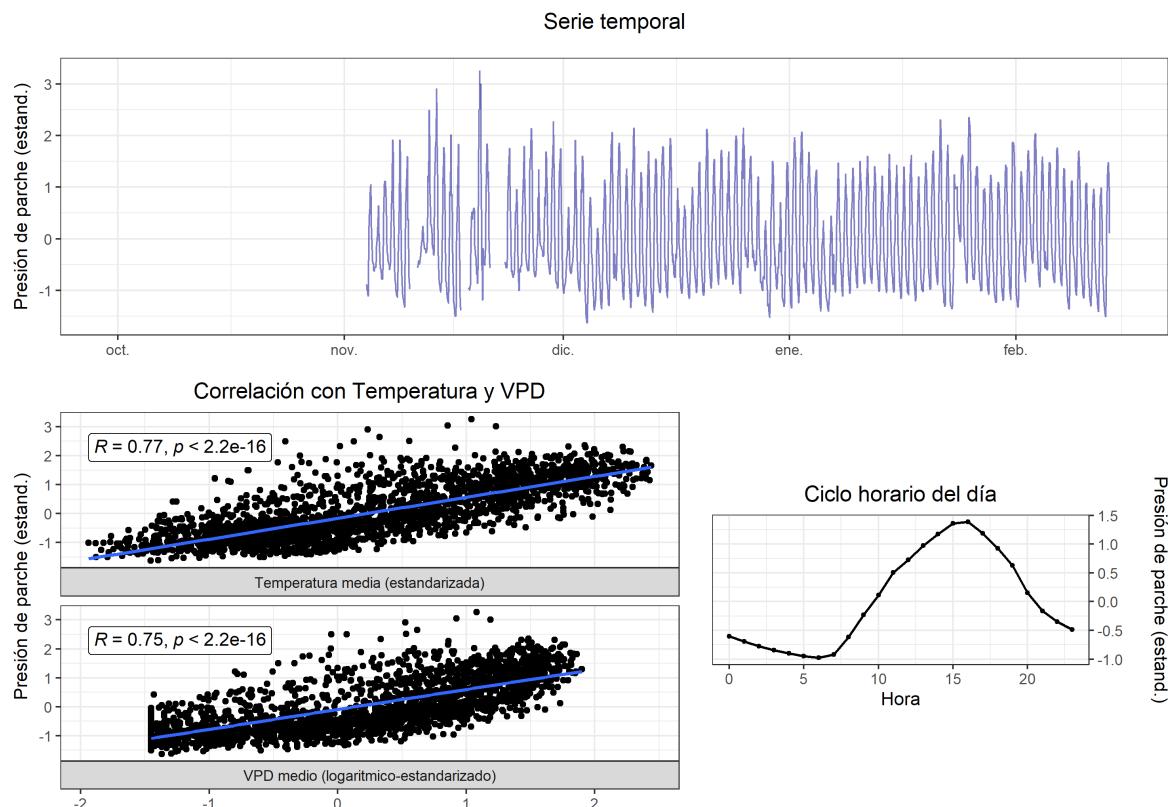
126 T3 (2022-2023)



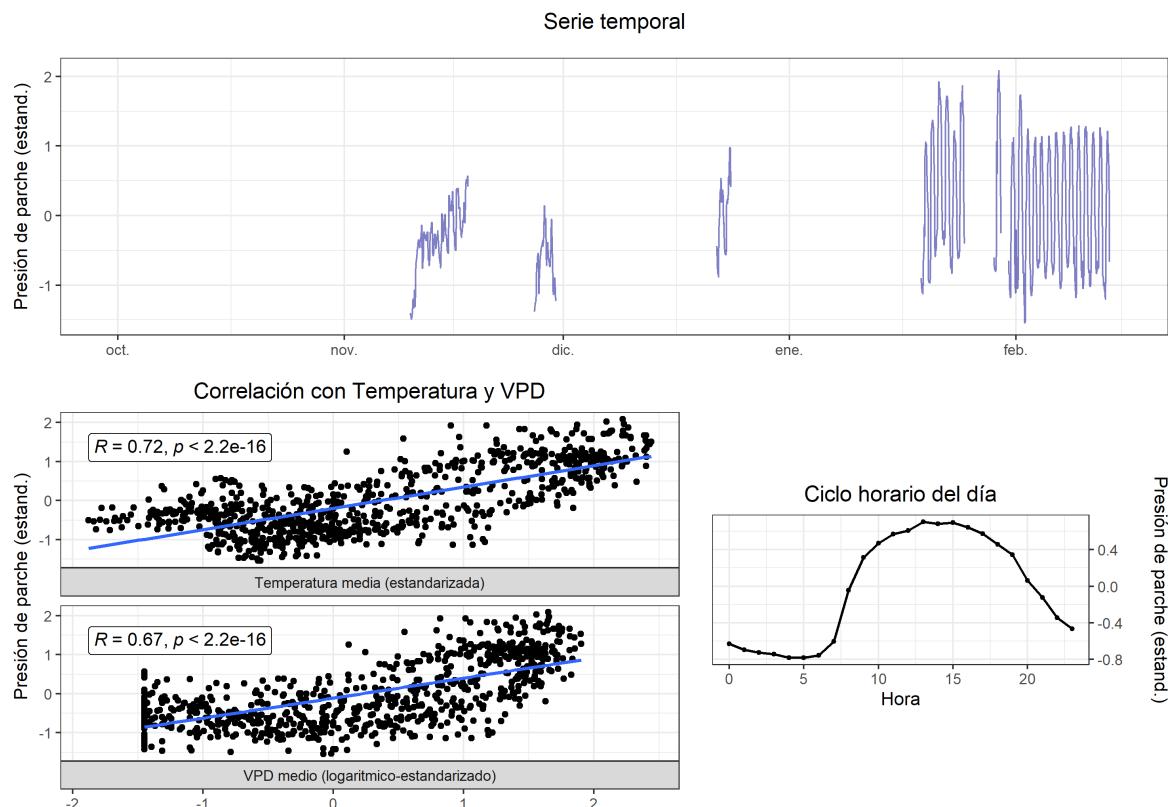
127 T4 (2022-2023)



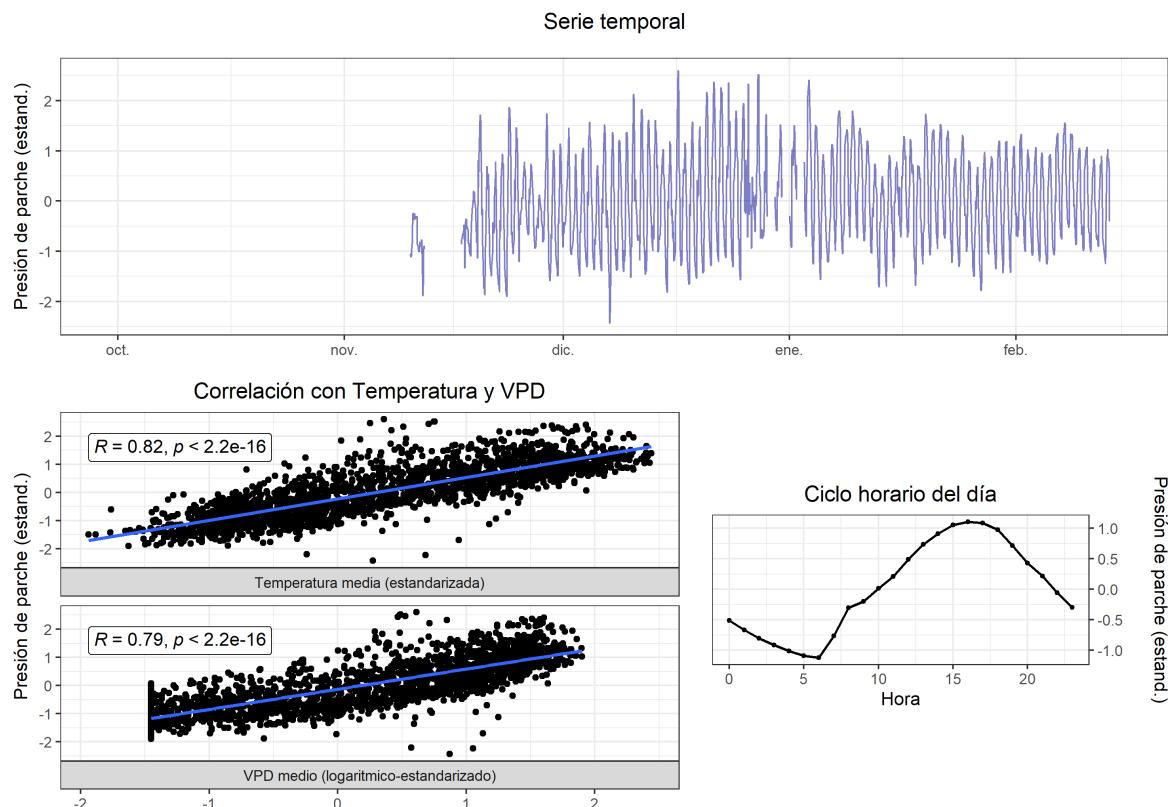
128 T1 (2023-2024)



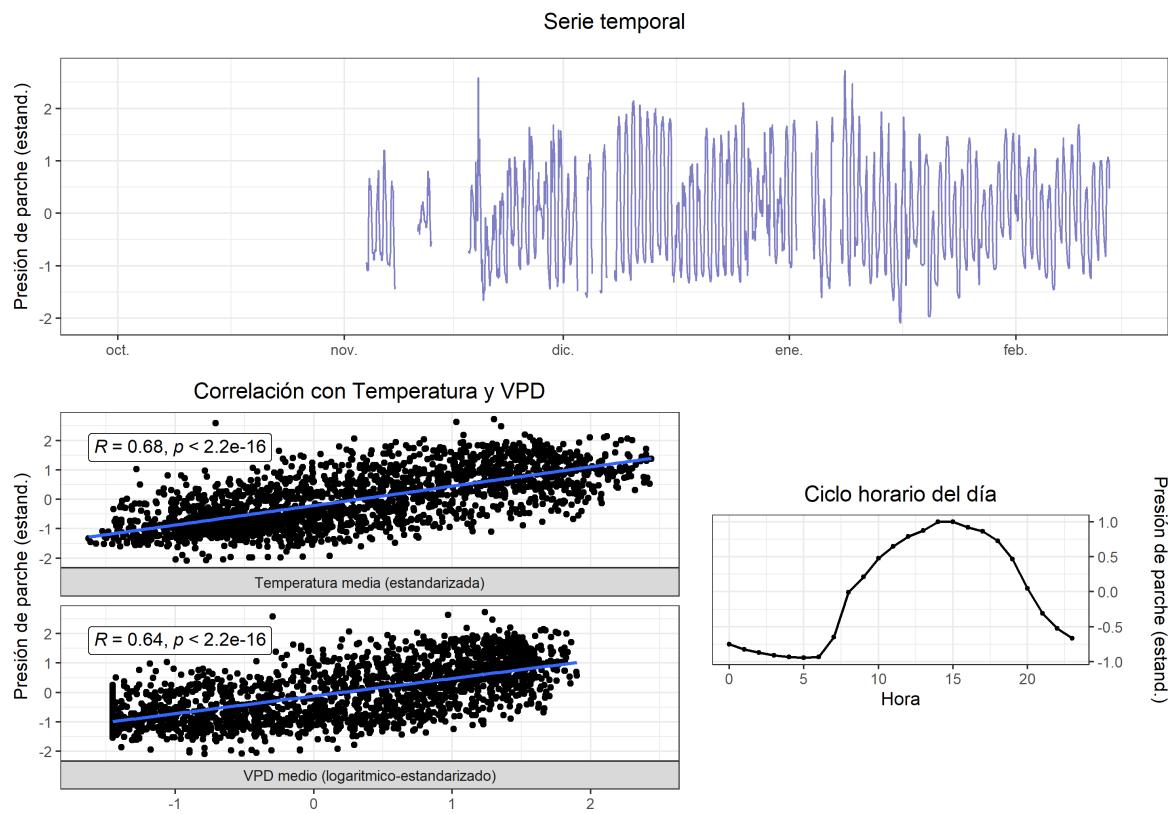
129 T2 (2023-2024)



130 T3 (2023-2024)



131 T4 (2023-2024)

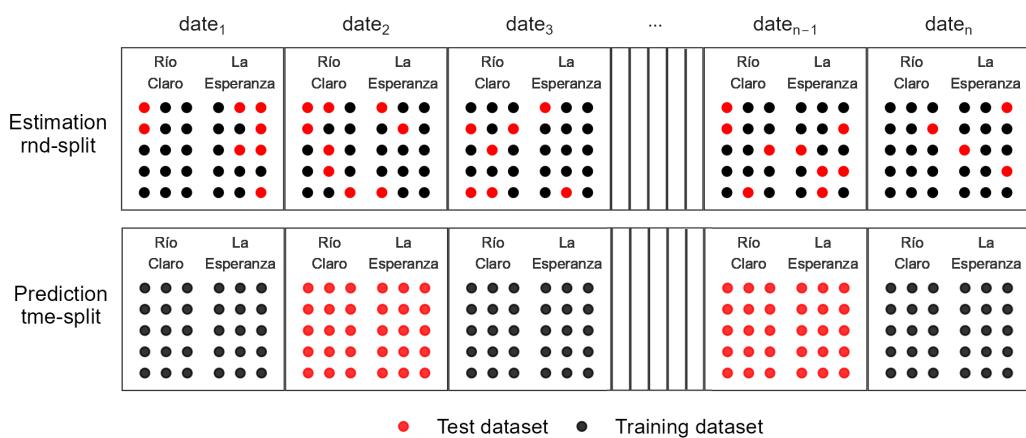


Parte VI

Modelo de potencial y SatOri

132 Modelos predictivos de potencial

Los resultados del modelamiento de potencial se muestran a continuación. Se evaluaron 12 configuraciones mediante remuestreo, combinando tres algoritmos (RF, XGBoost y SVM), dos esquemas de partición y el uso o no de componentes principales (PLS). Los dos esquemas de partición corresponden a (i) un esquema aleatorio (rnd_split), donde los datos de entrenamiento y prueba se seleccionaron al azar, y (ii) un esquema temporal independiente (tme_split), en el que se usaron fechas separadas para entrenamiento y prueba. En ambos casos, el 75% de los datos se asignó al entrenamiento y el 25% a la prueba.

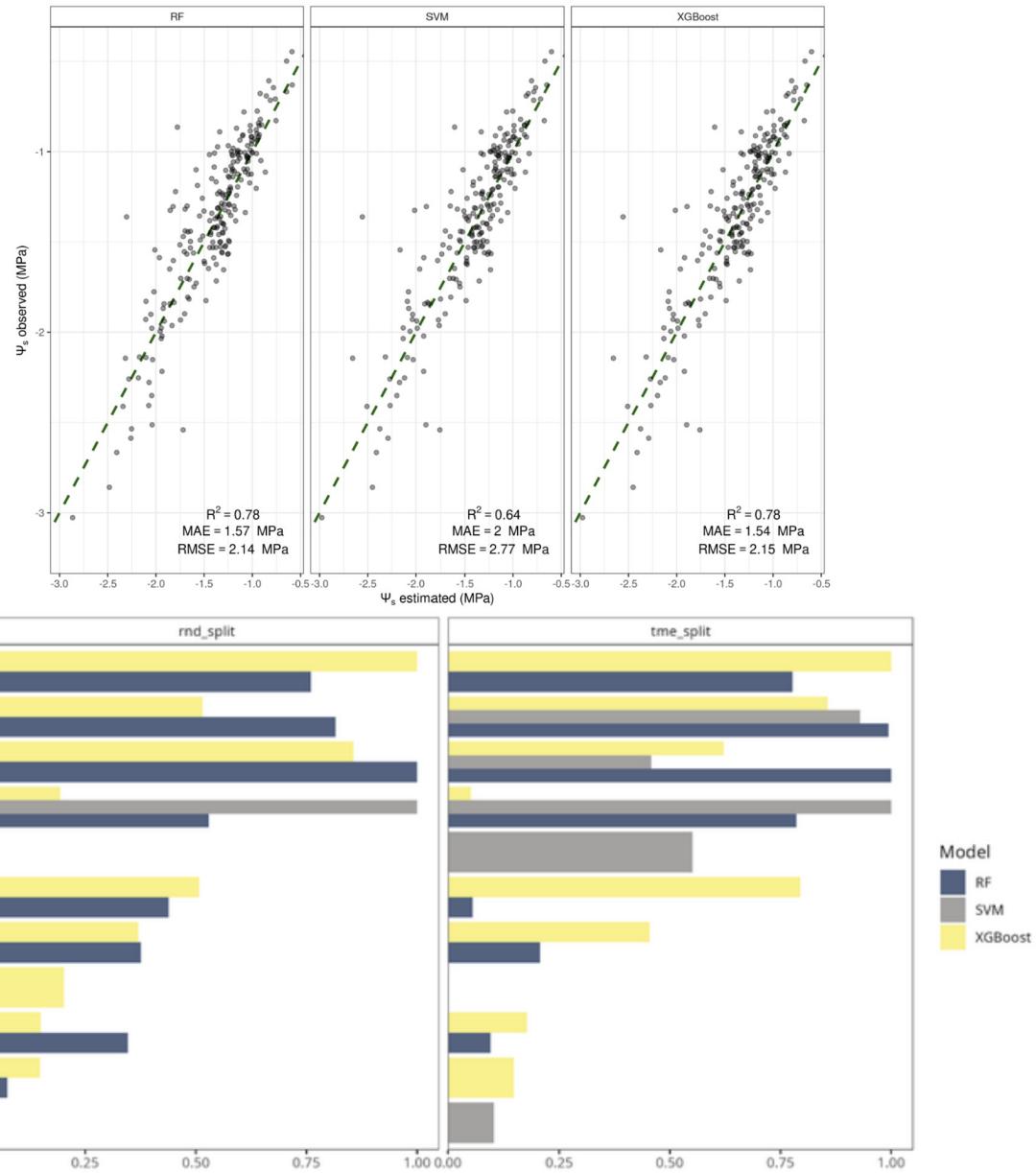


Bajo rnd_split, los valores de R^2 oscilaron entre 0.45 y 0.8, con XGBoost (0.77) y RF (0.76) obteniendo el mejor desempeño, seguidos por SVM (0.68). En tme_split, el rendimiento fue menor (R^2 entre 0.25 y 0.52), con diferencias menos marcadas entre modelos, destacando XGBoost, pls_SVM y SVM (~0.45).

Respecto a la importancia de las variables, los datos meteorológicos (ET0, VPD y temperatura) fueron los predictores más influyentes en ambos esquemas de partición. En rnd_split, SVM destacó la HR como variable clave, mientras que en tme_split, HR, VPD y temperatura fueron las más relevantes. Las variables derivadas de Sentinel-2 fueron secundarias en importancia, con MSI, DWSI y NDMI como los predictores más relevantes en ambos esquemas.

Tras la evaluación con remuestreo, los modelos fueron entrenados en el conjunto de prueba. En rnd_split, XGBoost y RF alcanzaron un R^2 de 0.76 y un RMSE de 0.24 MPa, mientras

que SVM obtuvo un R^2 de 0.62 y un RMSE de 0.3 MPa. En tme_split, el desempeño fue similar entre modelos ($R^2 = 0.59$), con RMSE entre 0.36 MPa (XGBoost) y 0.39 MPa (SVM). Se observó que el error aumentó en valores inferiores a -1.5 MPa, donde la escasez de datos limitó la capacidad predictiva de los modelos. Esta falta de información en condiciones de estrés hídrico severo se asocia con el cierre estomático, lo que puede afectar la producción y calidad del cultivo.



133 SatOri

133.1 Descripción general

El resultado final de este proyecto corresponde al prototipo de plataforma web SatOri, cuyo objetivo es la optimización del riego en ambos huertos de cerezos (Río Claro y La Esperanza).

Como se mencionó anteriormente, uno de los resultados del proyecto fue el desarrollo del modelo para la estimación del potencial hídrico xilemático con frecuencia diaria y de forma espacial. Además, para cada uno de los campos se logró obtener el punto umbral de potencial hídrico xilemático (TLP), el que corresponde al nivel mínimo al cuál puede llegar cada sector de riego.

Con el modelo de estimación diaria y espacial, más el umbral mínimo de potencial hídrico xilemático se implementó la plataforma web de SatOri.

133.2 Diseño de la aplicación

La aplicación fue creada en el lenguaje de programación R y con las plataformas de desarrollo [Github](#) y el servidor [Shinyapps](#).

En Github, mediante los “Github Actions” se automatizó la descarga de datos satelitales y meteorológicos de forma diaria para cada uno de los huertos, de acuerdo a disponibilidad. “Github Actions” se encarga de procesar los datos, suavizar los indicadores de vegetación obtenidos de Sentinel-2 y correr el modelo de machine learning, para estimar el potencial hídrico xilemático para cada día.

La plataforma fue creada con el paquete {shiny} de R.

133.2.1 Funcionamiento de la aplicación

El riego en los huertos frutales se realiza por sectores de riego, por lo que SatOri debe adaptarse a cómo se riega. Por lo tanto, una vez que se tiene estimado el potencial hídrico xilemático, se promedia su valor para cada sector de riego. Por otra parte, se tienen los valores de umbrales de riego mínimo para cada huerto. De acuerdo a esto, la plataforma define tres zonas de estado hídrico del sector de riego.

Esto se definió de la siguiente forma, la zona de color verde corresponde, a cuando el potencial hídrico xilemático se encuentra por sobre el umbral más un factor de seguridad. En este caso se asume que el sector se encuentra sin problemas de abastecimiento de agua. Luego, se tiene un sector amarillo, que se encuentra entre el punto umbral y el umbral más el factor de seguridad. Cuando el sector de riego llega a este nivel, la plataforma indica cuánto tiempo se debe regar. Esto lo realiza mediante el cálculo de la evapotranspiración de cultivo de los últimos dos días. Por último se tiene una zona naranja, la que indica que el sector de riego se encuentra por debajo del valor umbral. En este caso, la plataforma indica un tiempo de riego de acuerdo a los últimos cinco días de evapotranspiración de cultivo, esto con el objetivo de provocar un aumento rápido del estado hídrico.

133.3 Dashboard de la plataforma

En la Fig. 1 se muestra el dashboard de inicio de la plataforma SatOri. En él, se distinguen dos pestañas: “Panel” y “Resumen Temporada”. La Fig. 1 se encuentra desplegando las opciones de la pestaña “Panel”.



Figura 133.1: Figura 1: Dashboard ejemplo de la plataforma SatOri, pestaña “Panel”.

En los botones que se encuentran en la parte izquierda de la pantalla, el usuario puede seleccionar el huerto que quiere revisar, la temporada, y la fecha específica; para poder visualizar el potencial.

El mapa visualizará el potencial del huerto seleccionado y para el día seleccionado. En el mapa se puede pinchar en alguno de los sectores de riego. Al pinchar en alguno, los gráficos que se

encuentran a la derecha, mostraran los datos de potencial para dicho sector. La linea en rojo que se muestra, corresponde a los valores de potencial de los últimos siete días. Los colores, verde, amarillo y rojo, indican los diferentes niveles de estado hídrico que pueda alcanzar el sector. En el ejemplo, se ve que la linea para el sector de riego seleccionada se encuentra en verde por lo tanto no es necesario regar.

En el caso que la linea roja llegue a la zona de color amarillo, la plataforma dará un aviso de que es necesario regar e indicara el tiempo de riego para cada sector.

Por otra parte, en la parte superior de la aplicación, se muestra un resumen de cuantos sectores de riego están en verde, amarillo y rojo.

La Fig. 2 muestra la plataforma en la pestaña “Panel”. En este caso se muestra un mapa ampliado con el detalle de la variación del potencial hídrico xilemático durante toda la temporada para los sectores de riego.



Figura 133.2: Figura 2: Dashboard ejemplo plataforma SatOri, pestaña “Resumen Temporada”.

133.4 Acceso a la plataforma

Se puede acceder a la plataforma por medio de la página web de difusión del proyecto <https://s4tori.cl> o directamente por medio del link <https://s4tori.cl/app>.

References

Halbritter, Aud H., Amy Eycott, Sabine Reinsch, y Hans De Boeck. 2020. «The handbook for standardised field and laboratory measurements in terrestrial climate-change experiments and observational studies (ClimEx)». *Methods in Ecology and Evolution* 11 (1): 22-37.