



Center for Climate
and Resilience Research



Co-variabilidad de la columna de vapor de agua y precipitación en Chile

Raúl Valenzuela^{1,2} y Jorge Jara³

¹Instituto de Cs. de la Ingeniería, Universidad de O'Higgins

²Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2)

³GFZ German Research Centre for Geosciences

Proyecto Fondecyt Iniciación 11230184

Colaboración:

Gonzalo Contador, académico USM

Cristobal Quiñinao, académico PUC

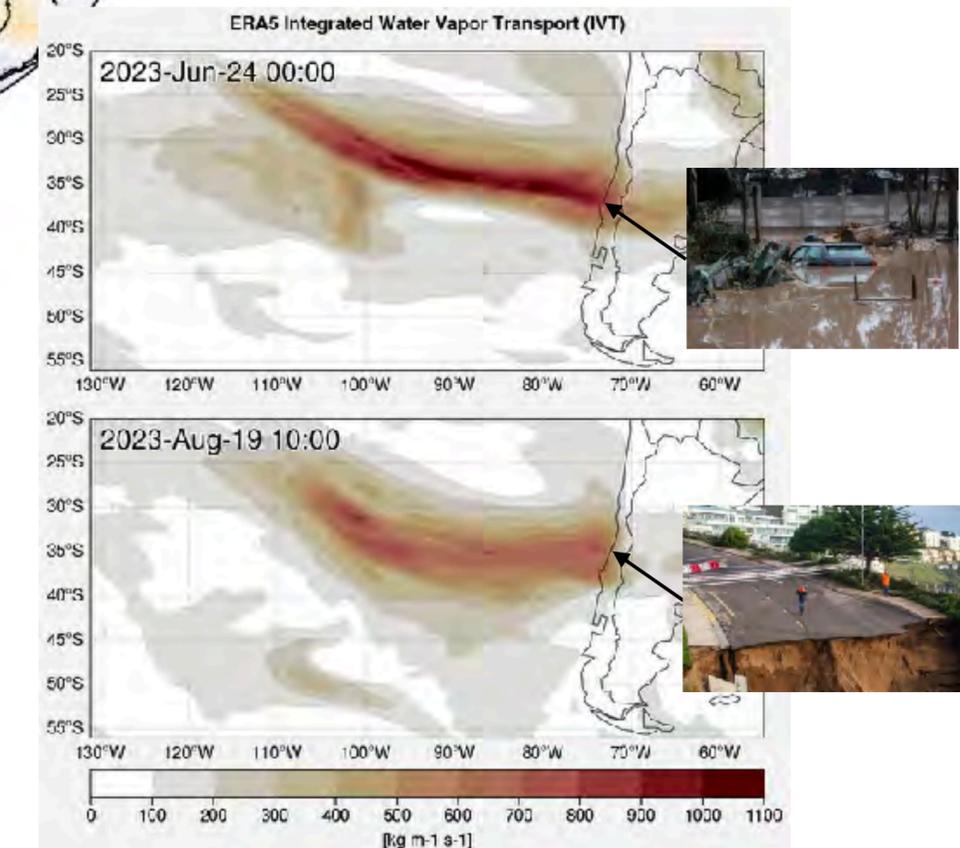
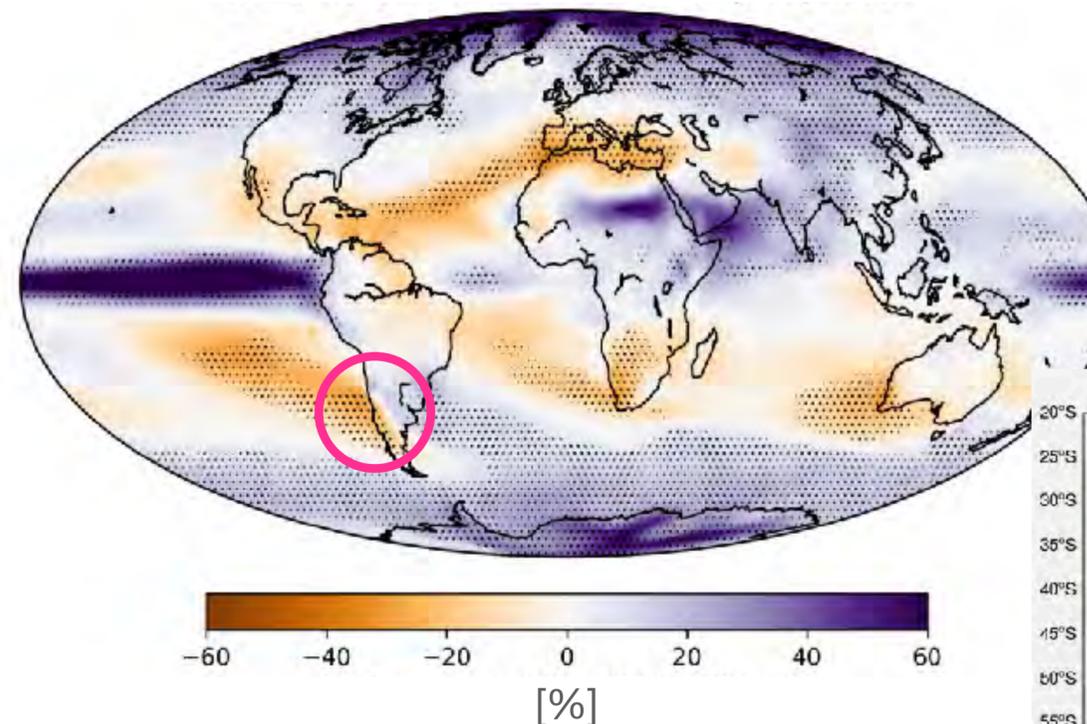
Bastián Rubio, estudiante UOH

7° Congreso de Oceanografía Física, Meteorología, y Clima del Pacífico Sur Oriental

4-6 Noviembre 2024 ♦ Iquique

- Pareciera que debemos acostumbrarnos a tener cada vez menos lluvias.
- Pero el año 2023 nos recordó que debemos estar más preparados que nunca.
- Uno de los factores más importante para eventos de precipitación extrema es el flujo de vapor de agua (IVT).
- Así como monitoreamos continuamente la temperatura y presión del aire ¿será posible hacer lo mismo con el vapor de agua (WV)?

Cambio porcentual de precipitación en el peor escenario de emisión (RCP8.5)
Diferencia entre periodos 1981-2000 y 2081-2100
Datos: Promedio multimodelo CMIP5



Medición de columna de vapor de agua

¿Cómo obtener series de tiempo?



Radiosonda

- Medición in-situ
- Con mucha suerte 2 observaciones por día



Radiómetro de microondas

- Emisión de microondas del vapor de agua
- Mediciones se degrada durante lluvia por presencia de gotas



Global Navigation Satellite System (GNSS)

- Retraso en la señal GNSS
- Mediciones continuas 24 hrs, all-weather

Principio de funcionamiento de GNSS

Tiempo de salida y tiempo de llegada

- 24 **satelites** (*Global Positioning System, GPS*) orbitan y emiten continuamente ondas de radio.
- La señal contiene información de **ubicación y tiempo** de emisión.
- Un **receptor** en tierra registra el tiempo de recepción de al menos 4 satelites y triangula posición.
- El principio de medición se basa en la **diferencia de tiempo** de la señal para calcular distancias.

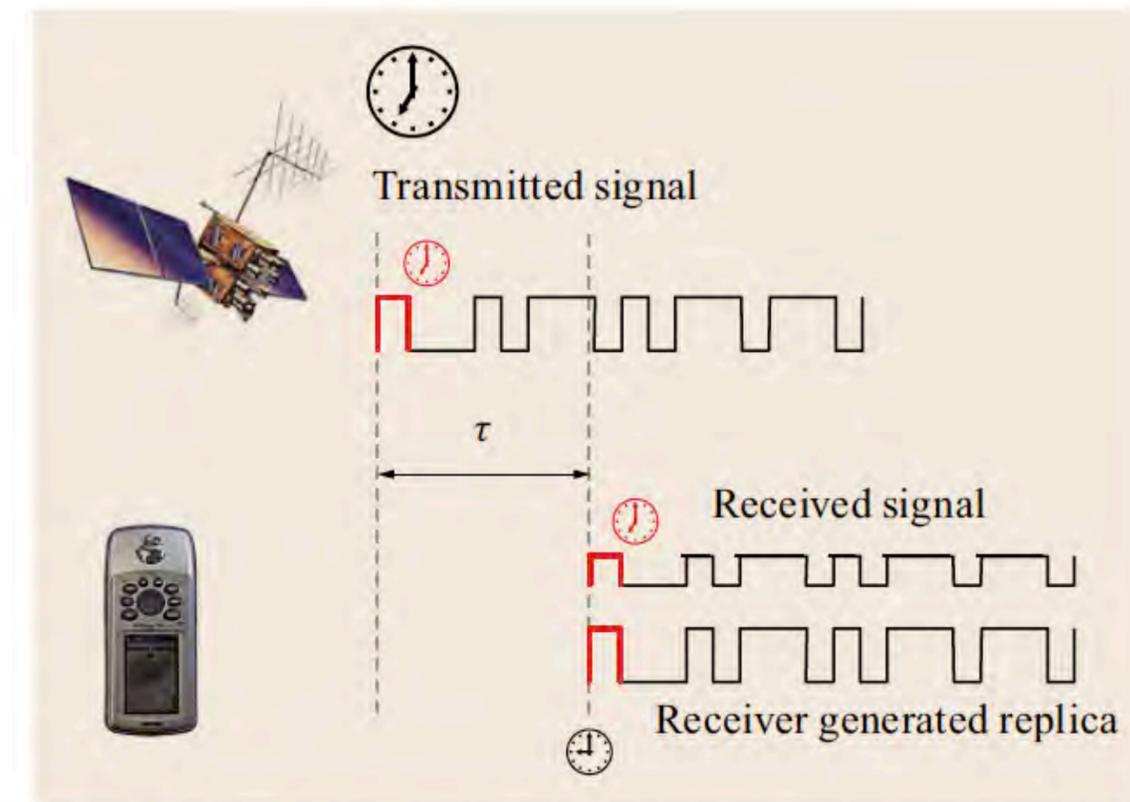


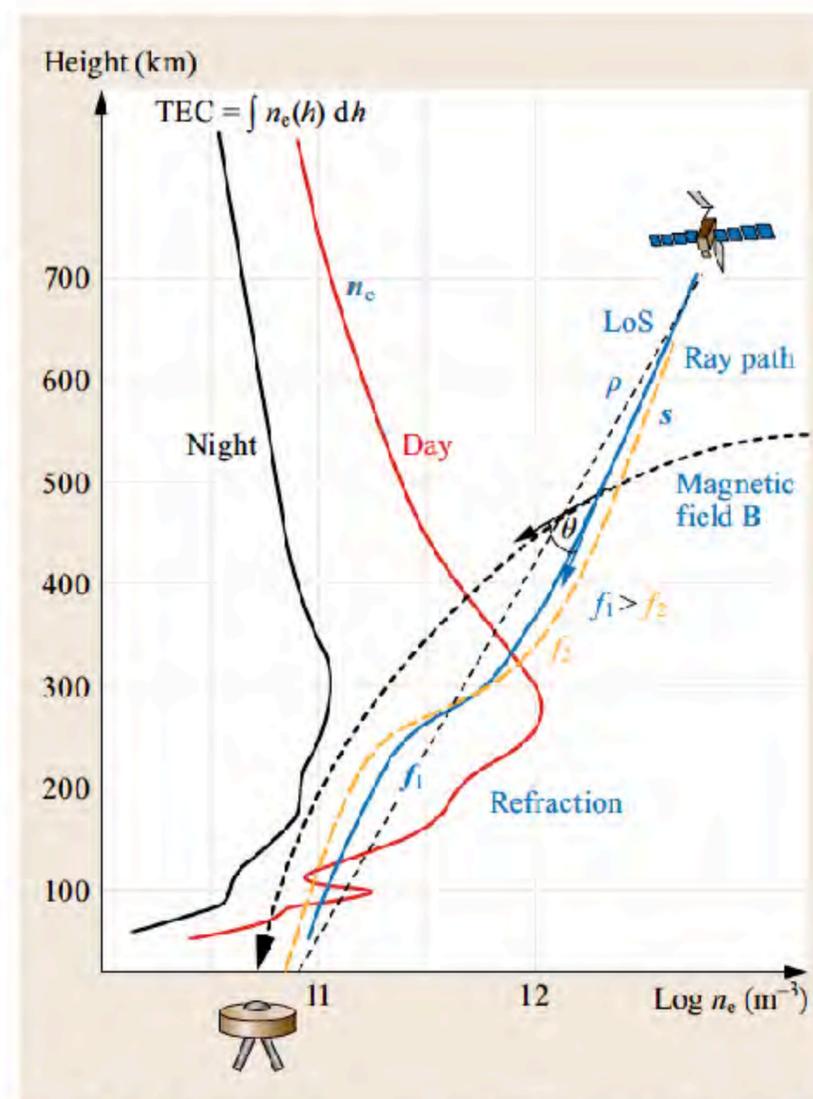
Fig. 1.3 Basic principle of pseudorange measurements

Teunissen and Montenbruck (Eds, 2017)

Zenith Total Delay

Efecto de la atmósfera en la onda de radio

- La señal GPS sufre retardos (**refracción** de EM) a lo largo de la trayectoria por: **atmósfera neutra**.
- El retardo por **atmósfera neutra** se descompone en retardo por refractividad hidrostática (N_h) y por presencia de vapor agua (N_w)
- La meteorología GPS estudia variabilidad del vapor de agua a partir de la variabilidad de ZTD.



Teunissen and Montenbruck (Eds, 2017)

$$ZTD = ZHD + ZWD$$

$$ZHD = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{\infty}} N_h(z) dz$$

$$ZWD = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{\infty}} N_w(z) dz$$

$$ZWD = ZTD - ZHD$$

Valor
proporcional
a CWV

Valor
calculado
por **GPS**

Valor
calculado con
meteorología

Objetivos

- Obtener datos de ZTD procesados por Nevada Geodetic Laboratory (NGL, resolución de 5 minutos).
- Derivar CWV usando estaciones meteorológicas y ERA5 (resolución horaria a diaria).
- Comparar variabilidad anual del WV a lo largo de Chile.
- Relacionar variabilidad de WV y precipitaciones.

Datos y métodos



Zenith Total Delay

Obtención de columna de vapor de agua

$$\text{ZWD} = \text{ZTD} - \text{ZHD}$$

Valor derivado Valor calculado por **GPS** Valor calculado con meteorología

$$\text{ZHD}(P_s, \lambda, H) = \frac{2.2779P_s}{1 - 0.00266 \cos 2\lambda - 0.00028H}$$

Elgered et al (1991)

P_s = presión atmosférica

λ = latitud

H = altura geopotencial

$$\text{CWV} = \text{ZWD} \times \Pi$$

Columna de vapor de agua Valor derivado Factor que depende de meteorología

$$\Pi(T_m) = \frac{10^6}{\rho_w R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right)}$$

$$T_m = \frac{\int_0^\infty \frac{e}{T} dz}{\int_0^\infty \frac{e}{T^2} dz}$$

Temperatura promedio aire en perfil (Davis et al 1985)

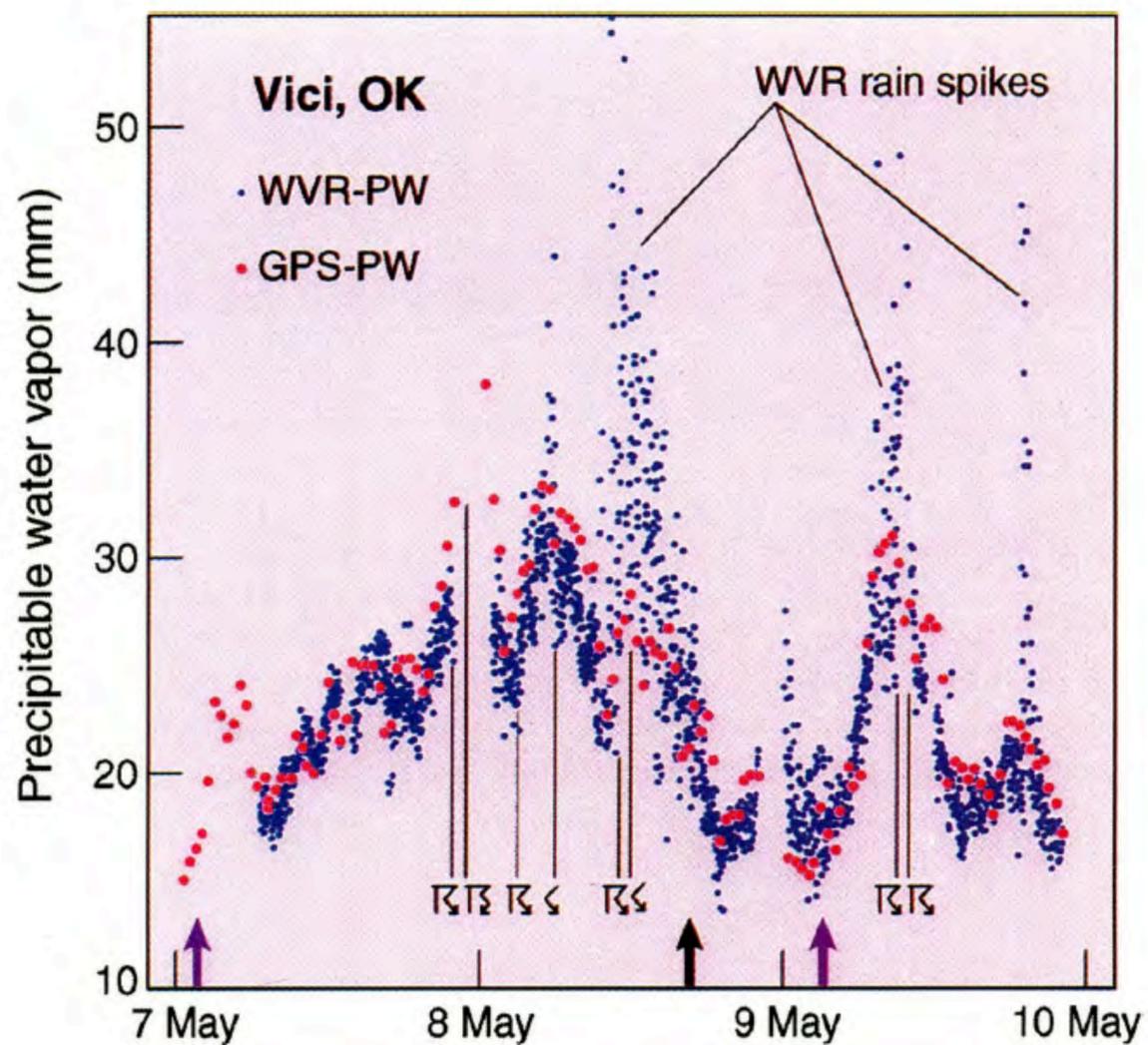
$$T_m = 70.2 + 0.72T_s$$

RMS ~2% (Bevis et al 1992)

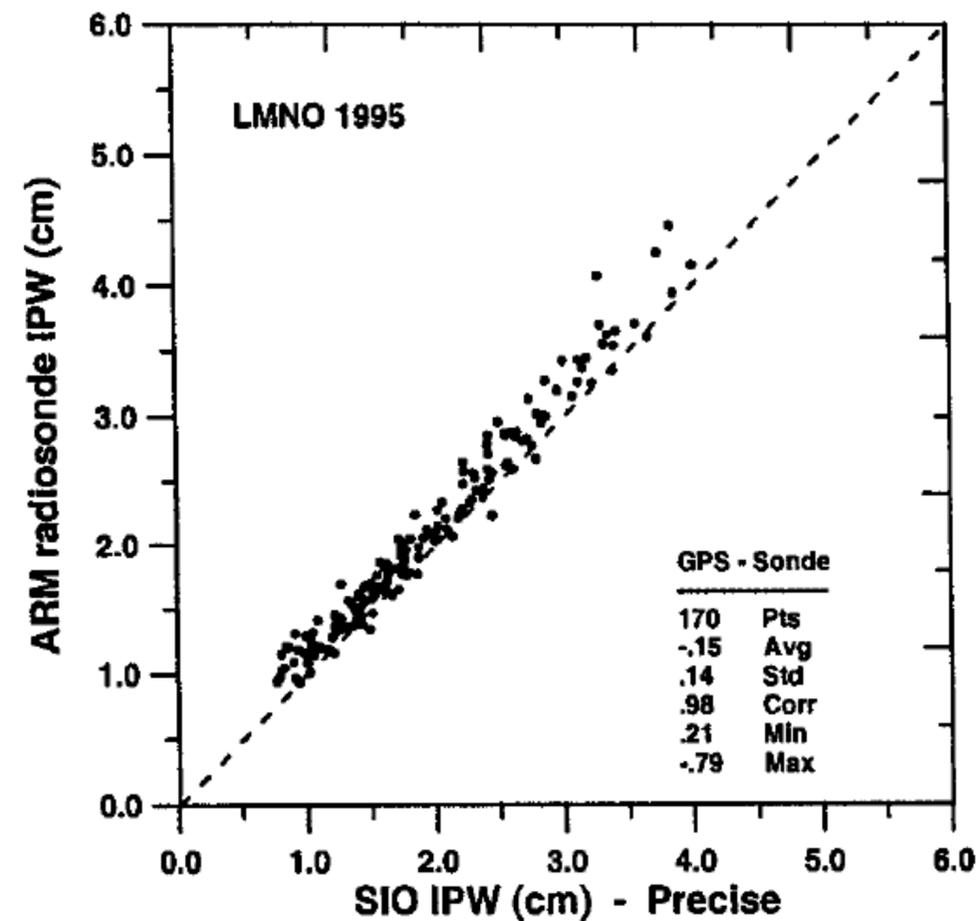
T_s = temperatura del aire

Zenith Total Delay

Ejemplos



Businger et al (1996)

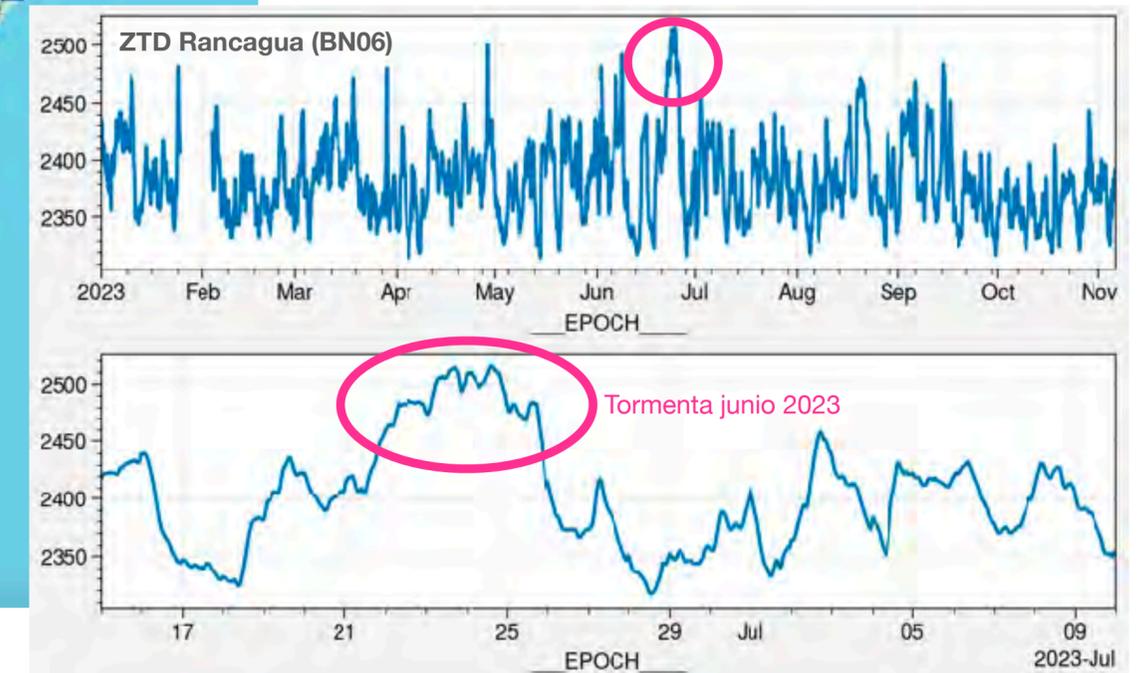
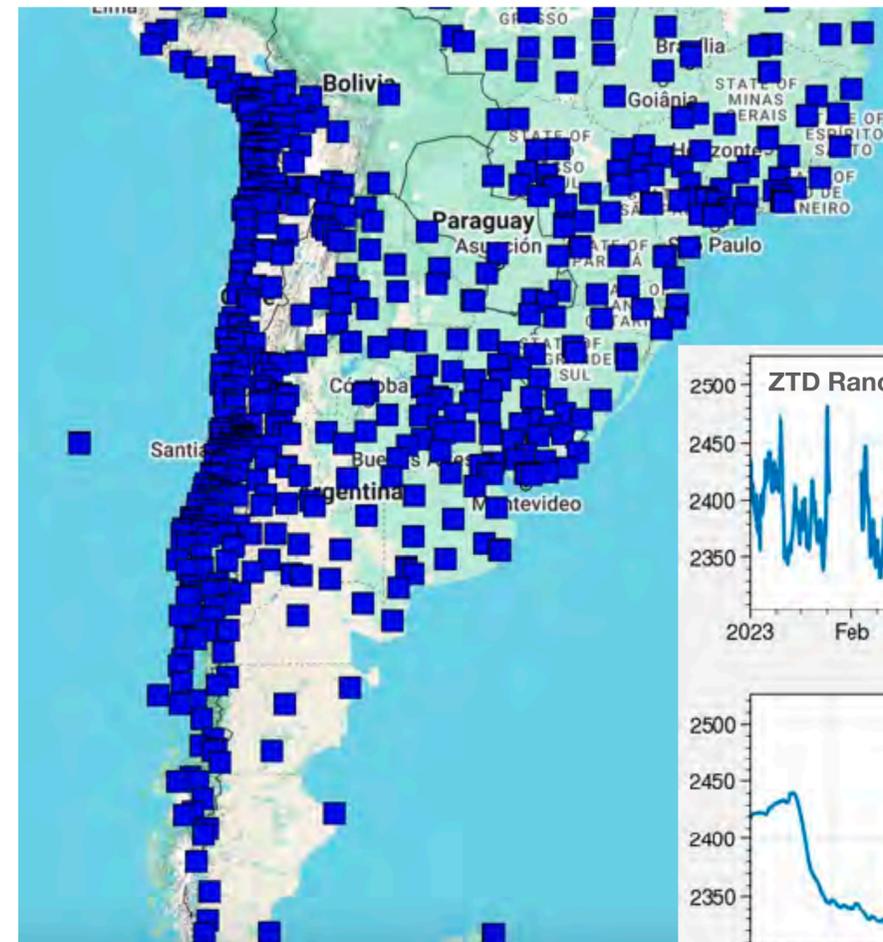


Wolf and Gutman et al (2000)

Series de tiempo de ZTD

Archivos descargados desde NGL

- Descarga desde <http://geodesy.unr.edu/magnet.php>
- Script para automatizar descarga de estaciones en territorio chileno.
- Selección de estaciones con 15 o más años (climatología).
- Inspección visual para detectar anomalías.



Series de tiempo meteorología

Descargas de ERA5

- Temperatura a 2 metros
- Presión superficial
- Altura geopotencial
- Interpolación bilineal al punto de estación GNSS
- Interpolación hipsométrica a la altitud de estación GNSS

Series de tiempo meteorología

Descargas de meteorología

- Descarga de datos desde <https://explorador.cr2.cl>
- Descarga de datos de Dirección Meteorológica de Chile, Agromet
- Temperatura, presión, precipitación
- Inspección visual de datos anómalos
- Estación más cercana a receptor GNSS

Series de tiempo meteorología

Descargas de radiosondas

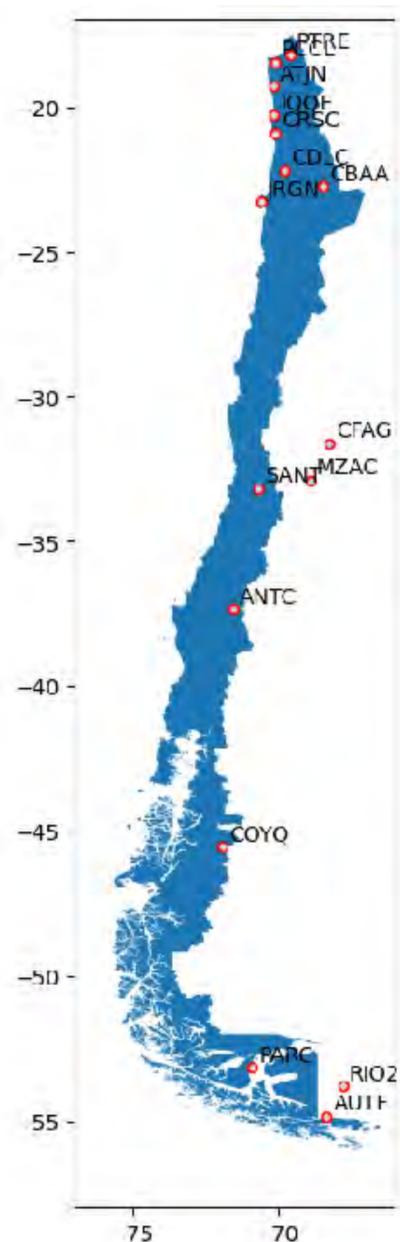
- Descarga de datos desde NCEI-IGRA (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-balloon/integrated-global-radiosonde-archive>)
- Inspección visual de datos anómalos
- Uso de CWV para comparar con GPS-CWV

Resultados



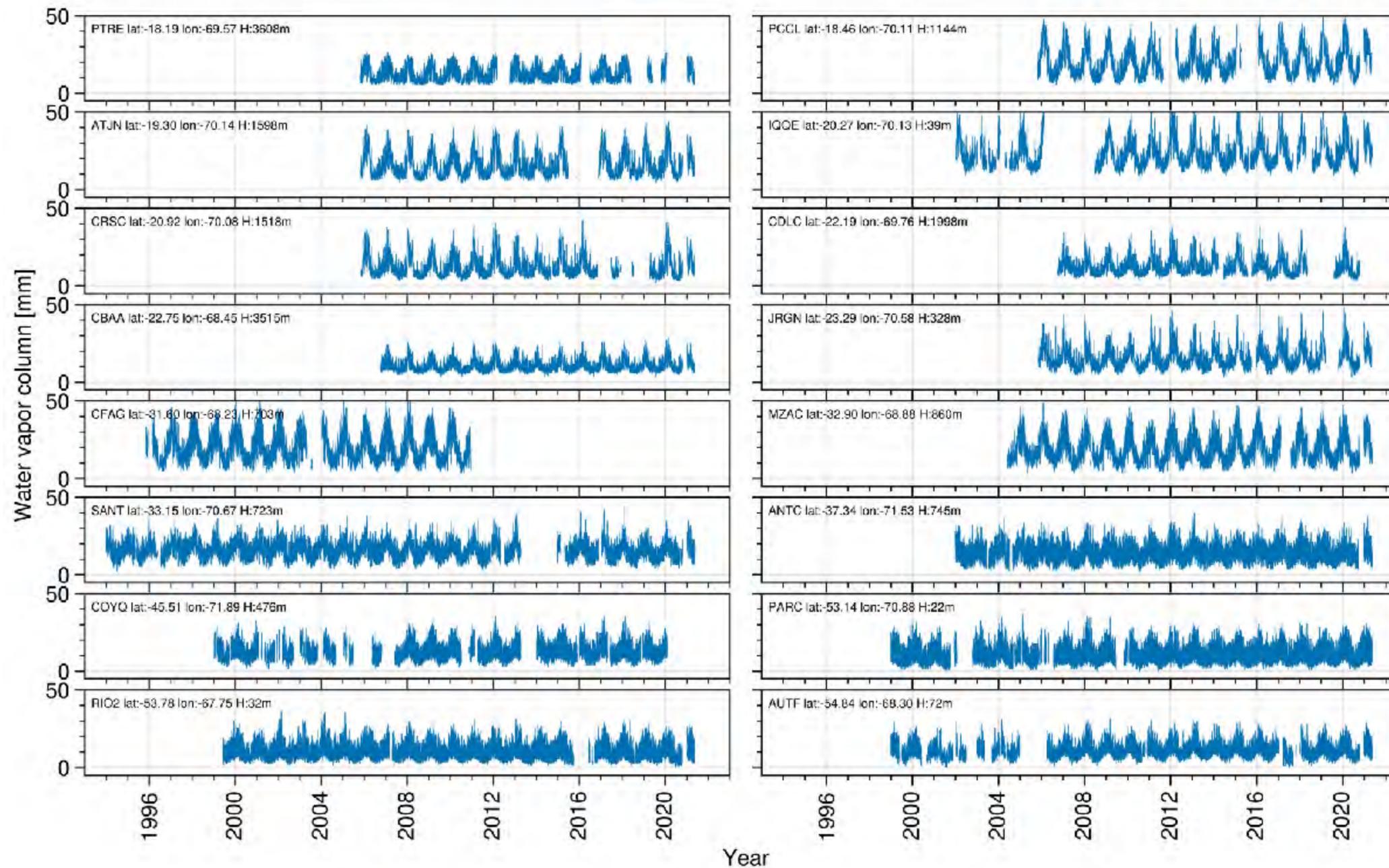
Estaciones y disponibilidad de datos ZTD

16 estaciones en periodo 1994-2021 (28 años)



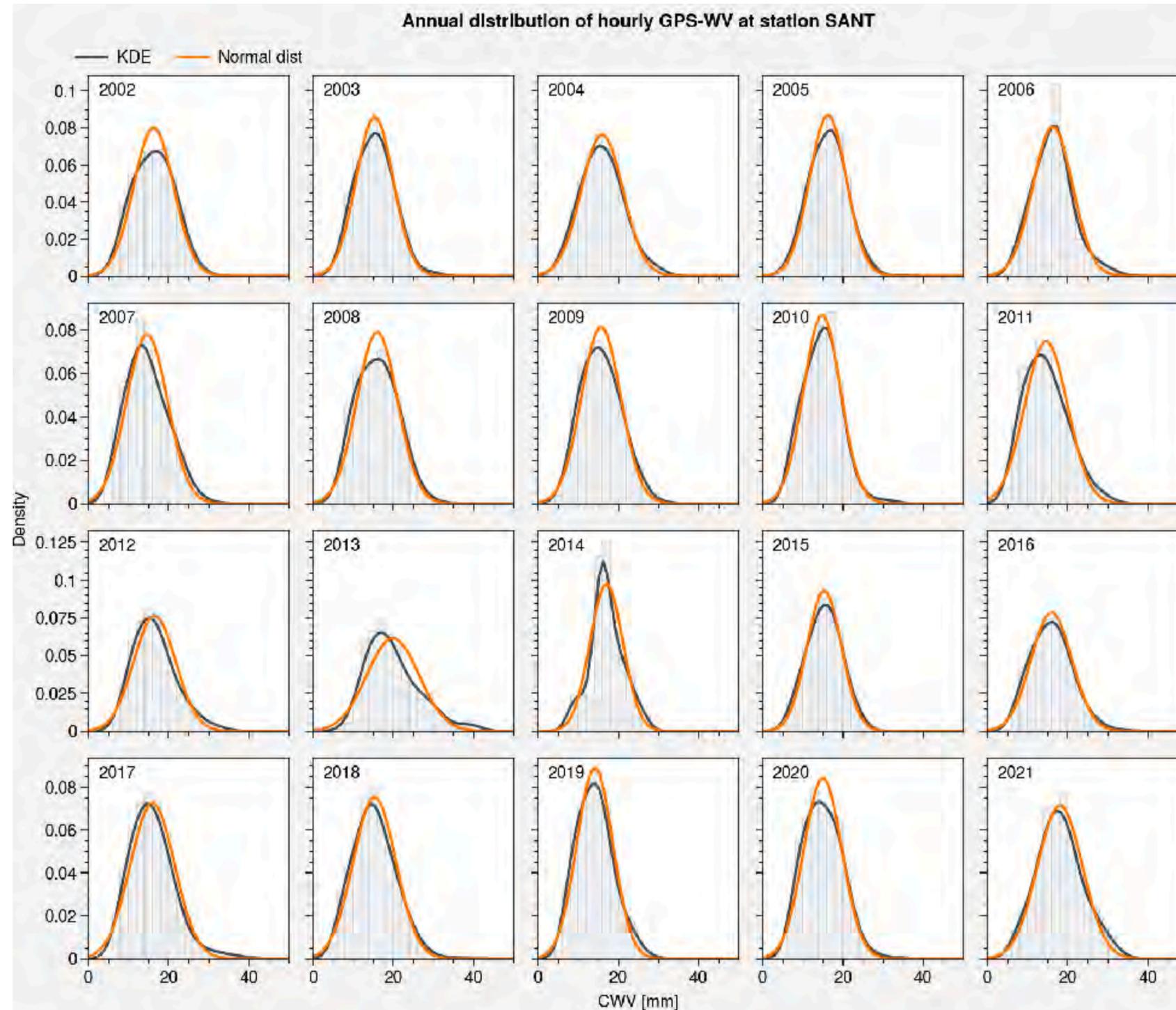
Vista general de series de tiempo de GPS-WV

16 estaciones en periodo 1994-2021 (28 años)

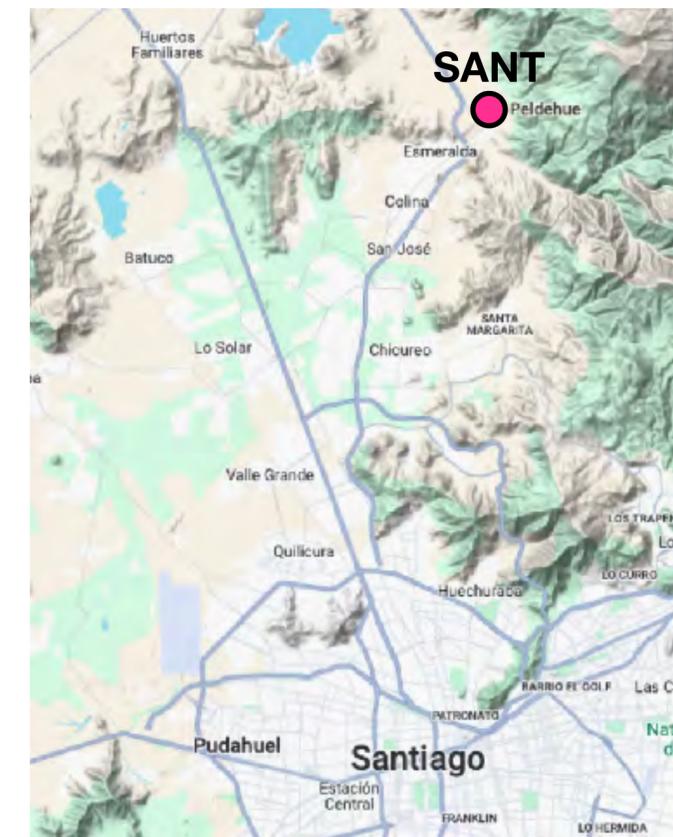


- Alta frecuencia y largos periodos de datos perdidos.
- Destaca ciclo anual del WV
- Distintos patrones dependiendo de la zona geográfica (altitud, latitud, distancia a costa)

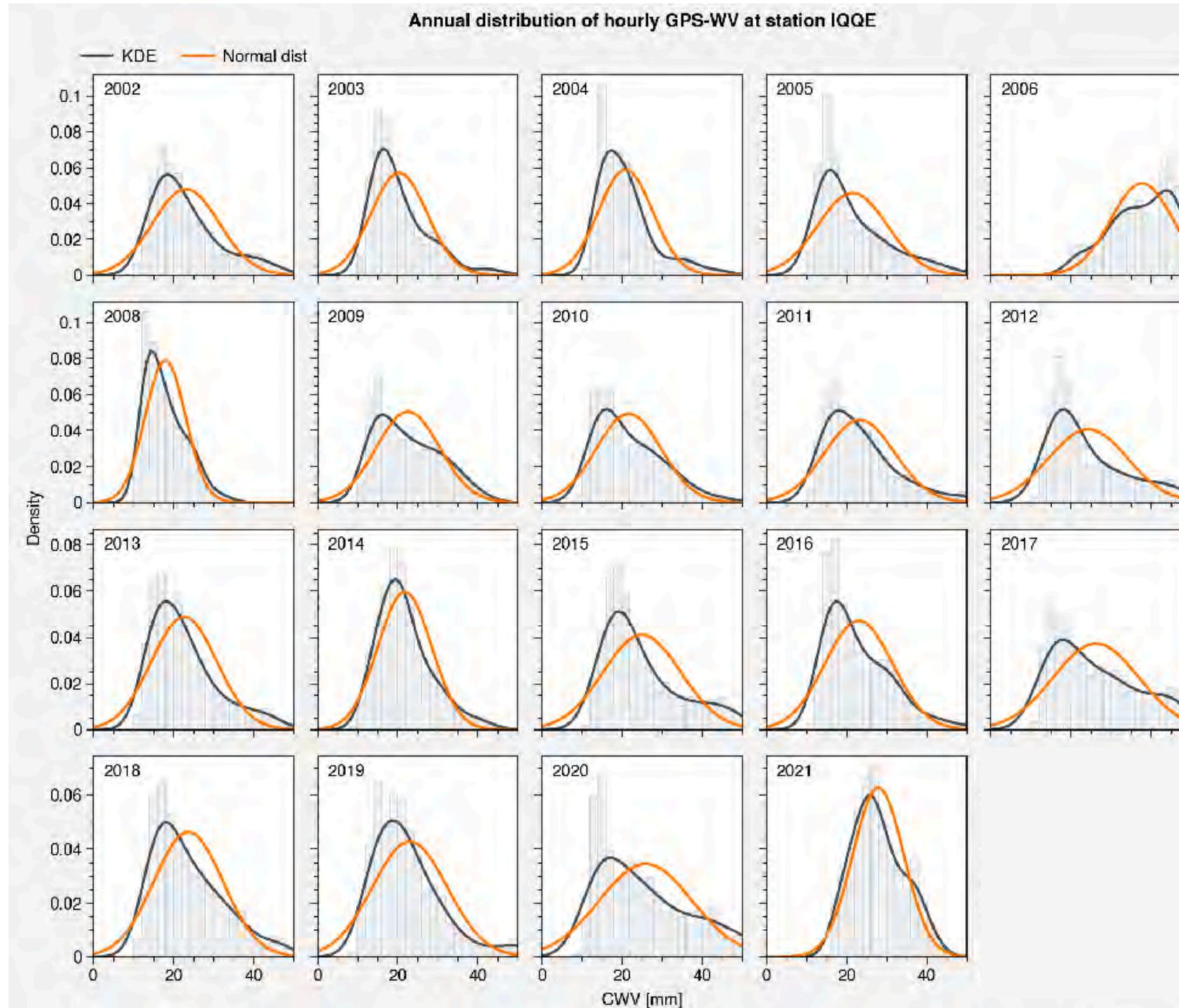
Variabilidad anual de WV



- Distribuciones similares en ANTC, COYQ, PARC, AUTF (centro, sur y Patagonia)



Variabilidad anual de WV



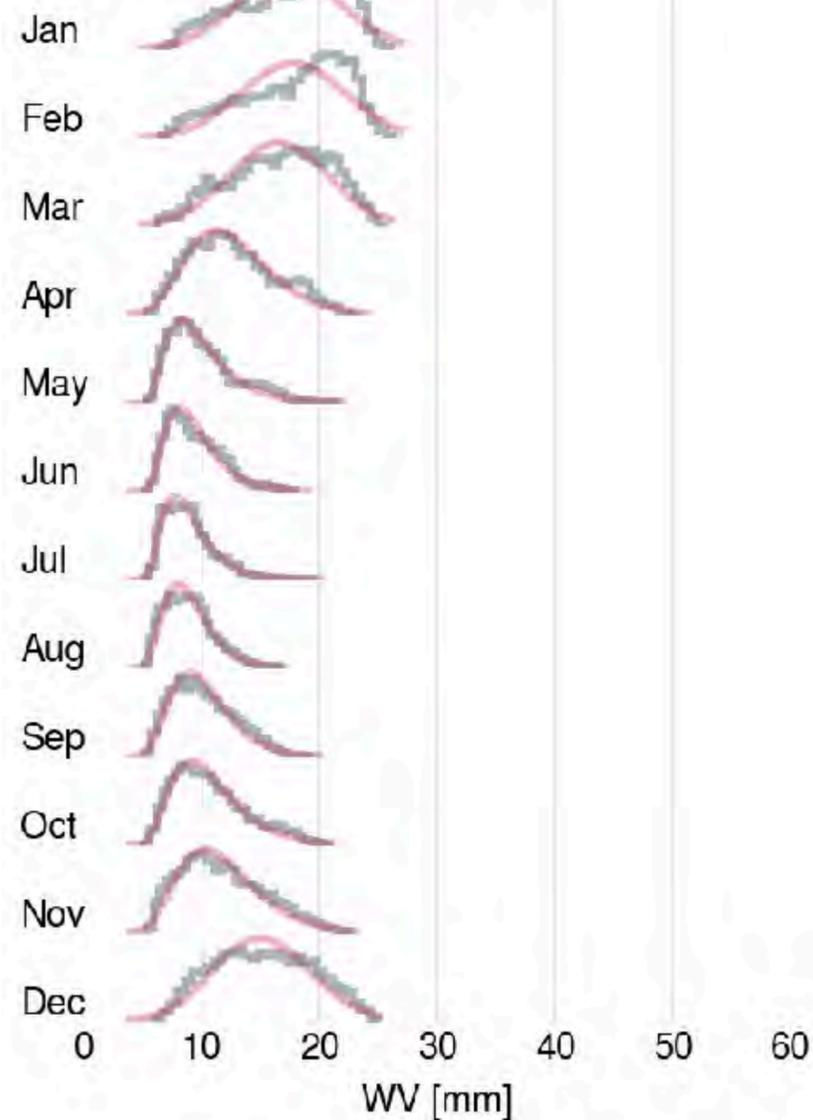
- Distribuciones similares en PTRE, PCCL, ATJN, CRSC, CDLC, CBAA, JRGN (norte grande)



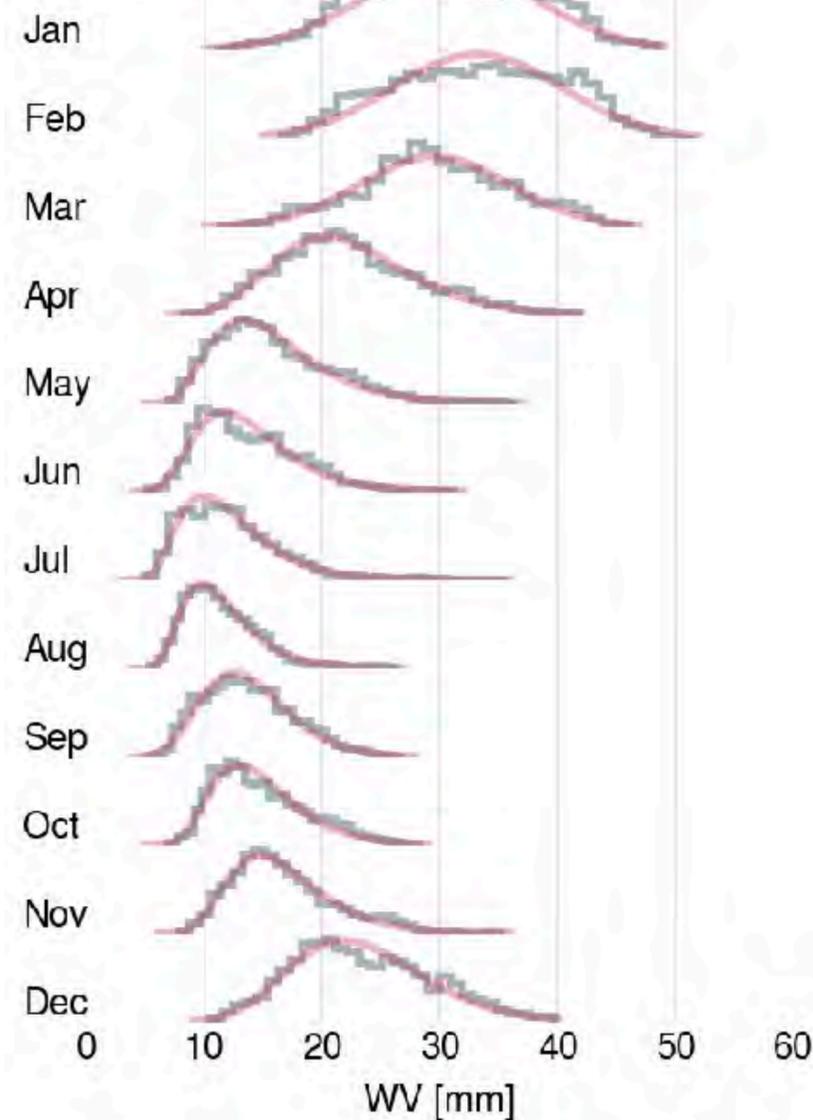
Variabilidad mensual de WV

Transición de distribución mensual (log-normal, log-normal⁻¹)

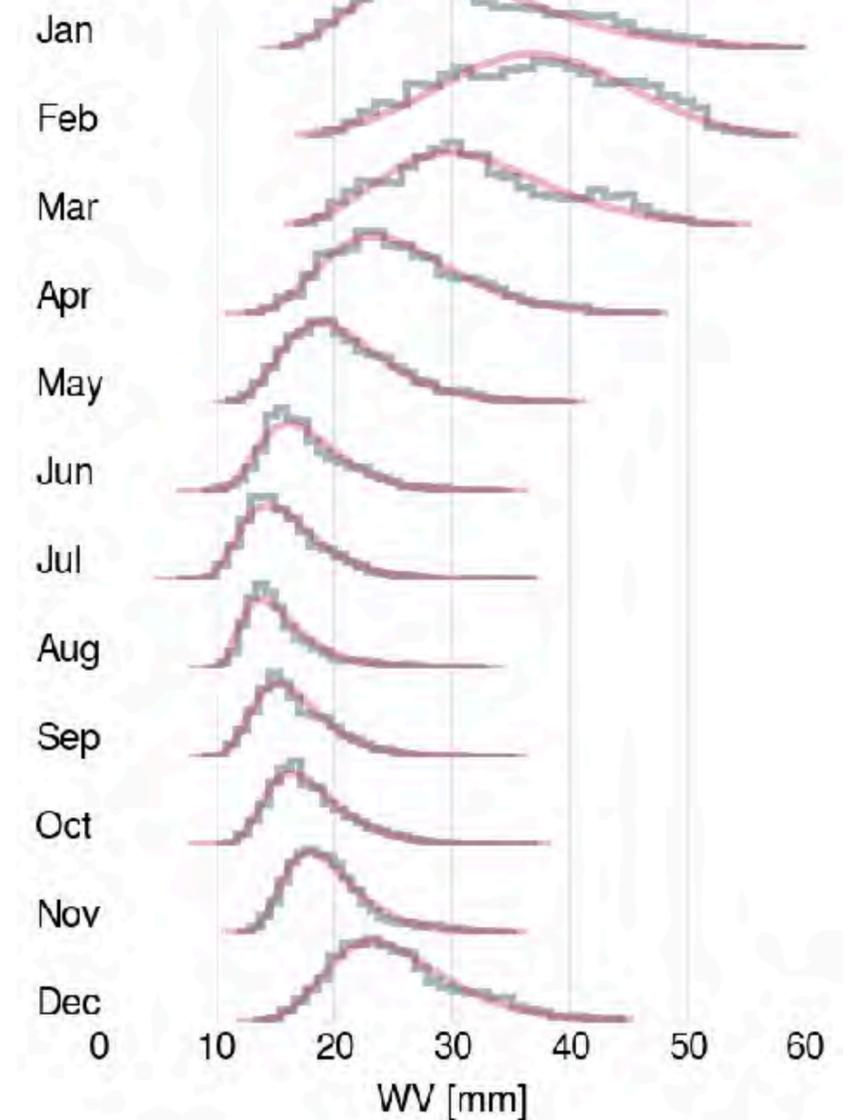
PTRE (18.19°S, 3608 masl)



PCCL (18.46°S, 1144 masl)

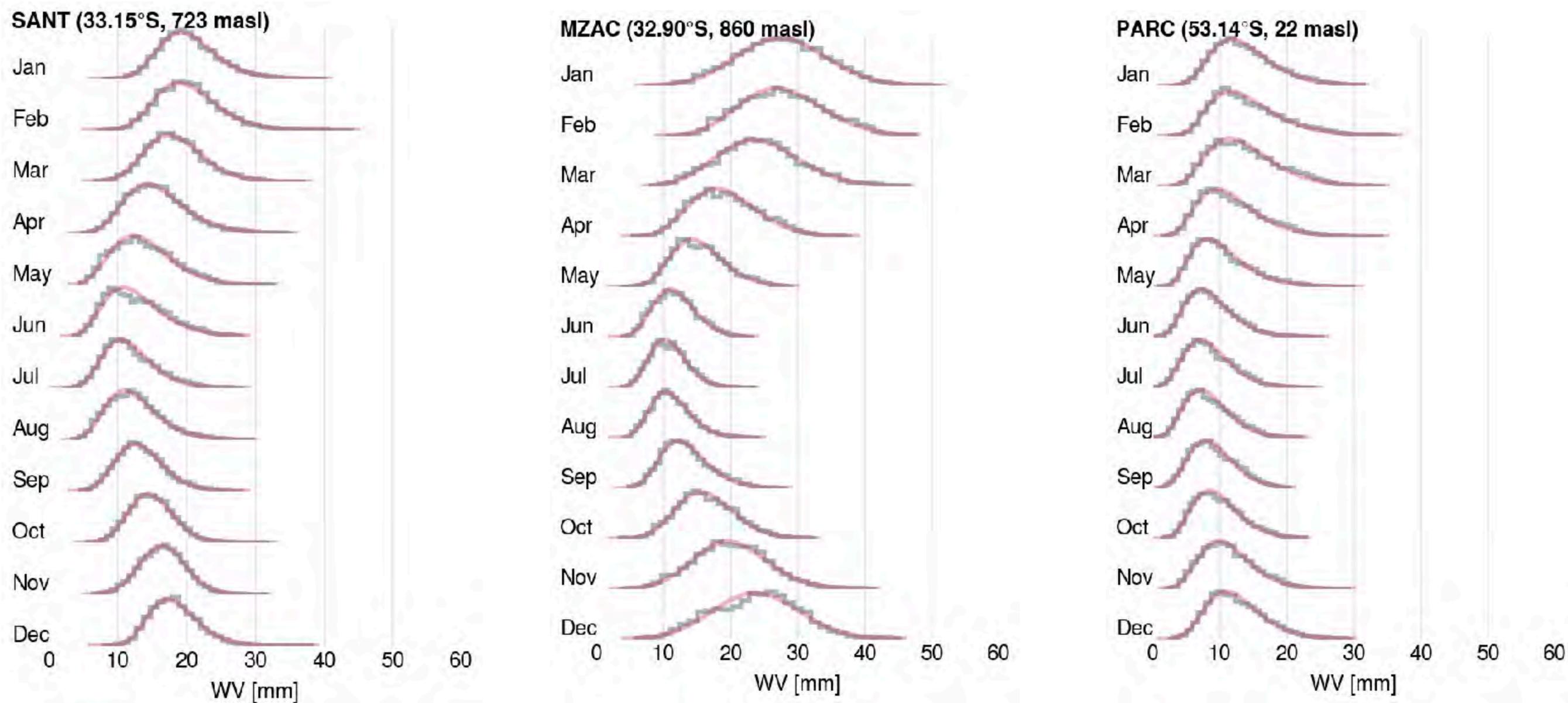


IQQE (20.27°S, 39 masl)



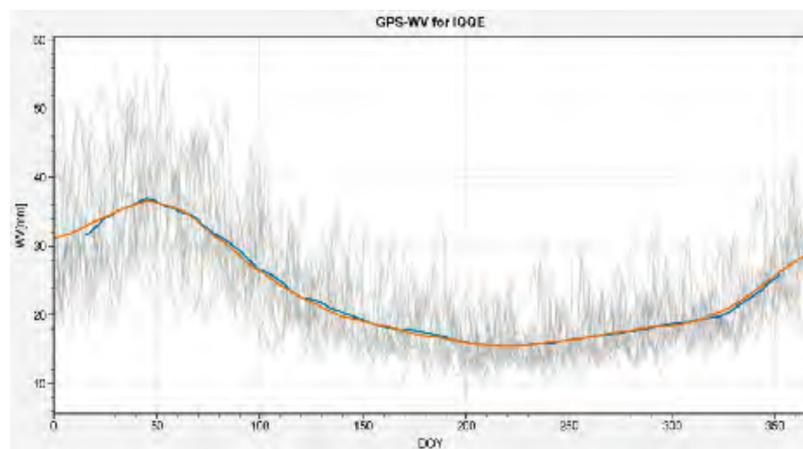
Variabilidad mensual de WV

Transición de distribución mensual (log-normal, log-normal⁻¹)



Ciclo anual de WV

Máximo en Febrero, mínimo en Julio/Agosto

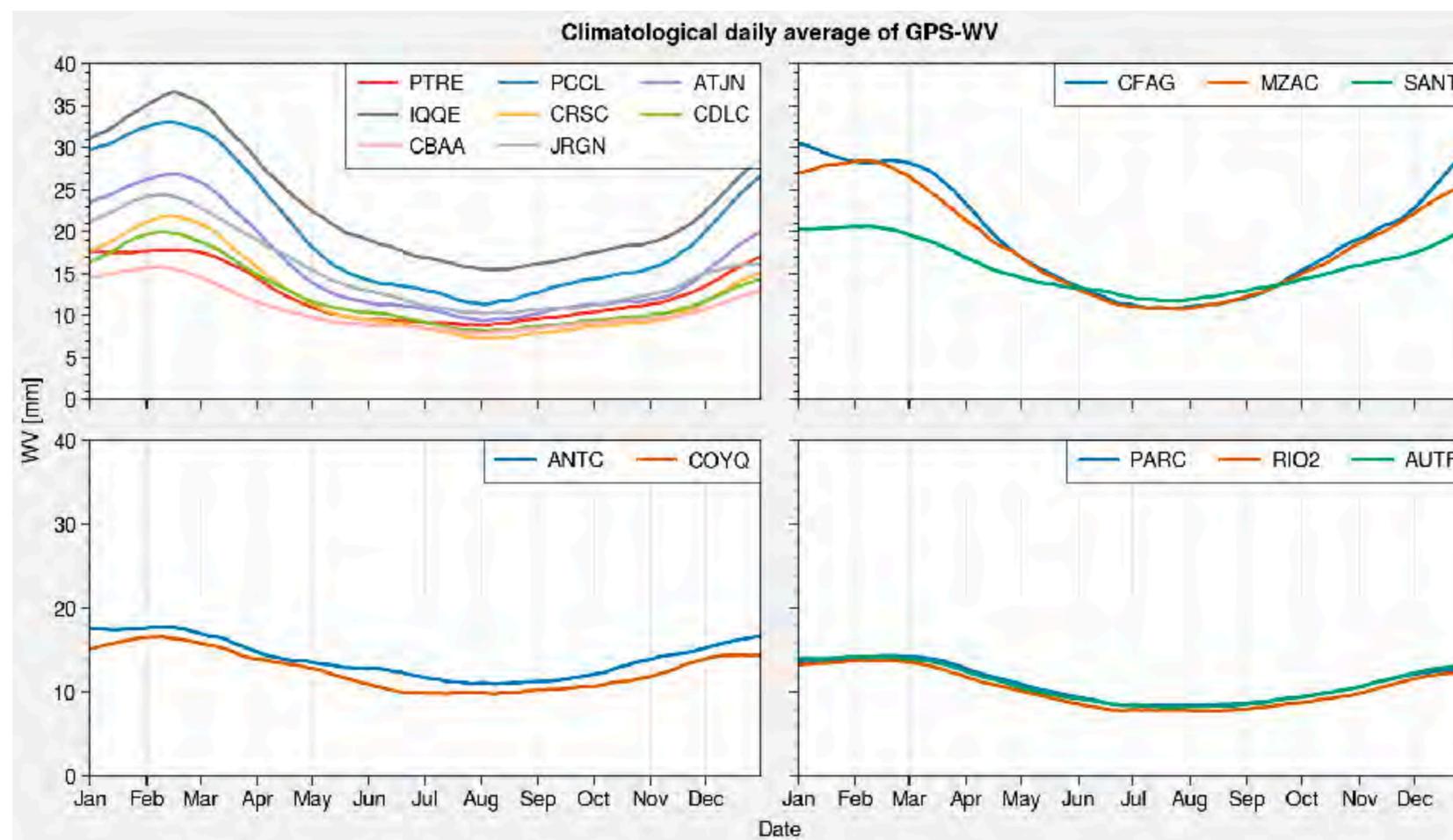


Líneas:

Gris: WV horario

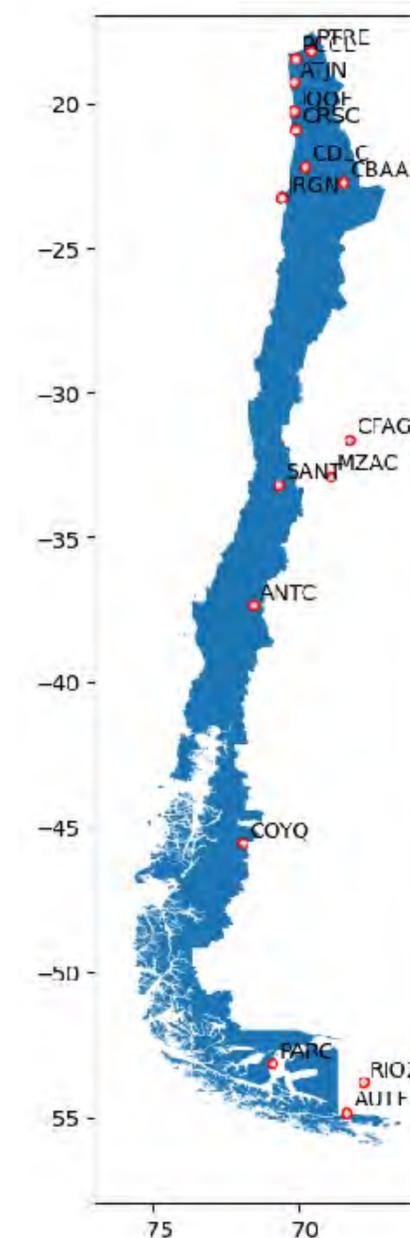
Azul: media móvil sobre promedio diario

Naranja: filtro de Savitzky-Golay sobre promedio diario



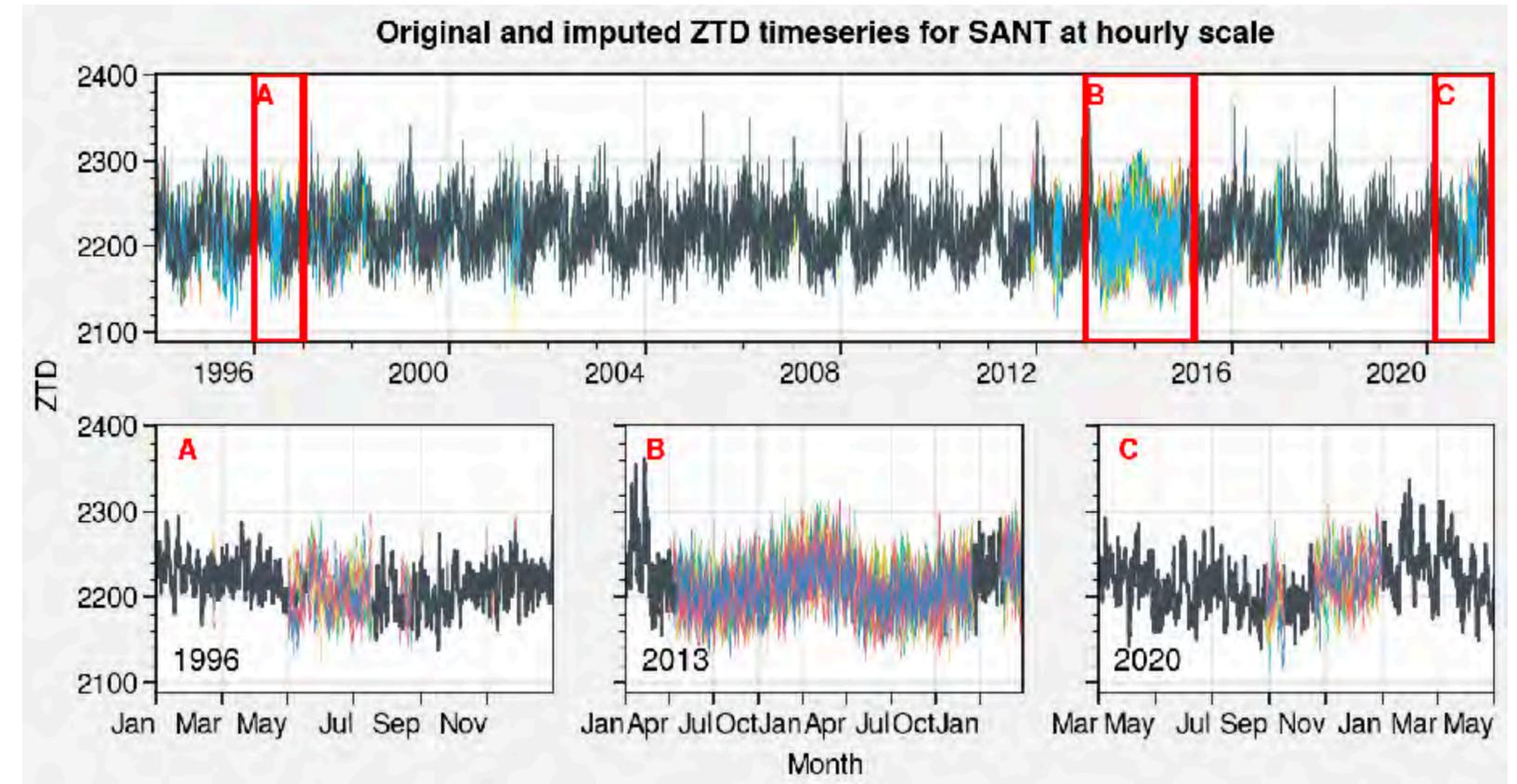
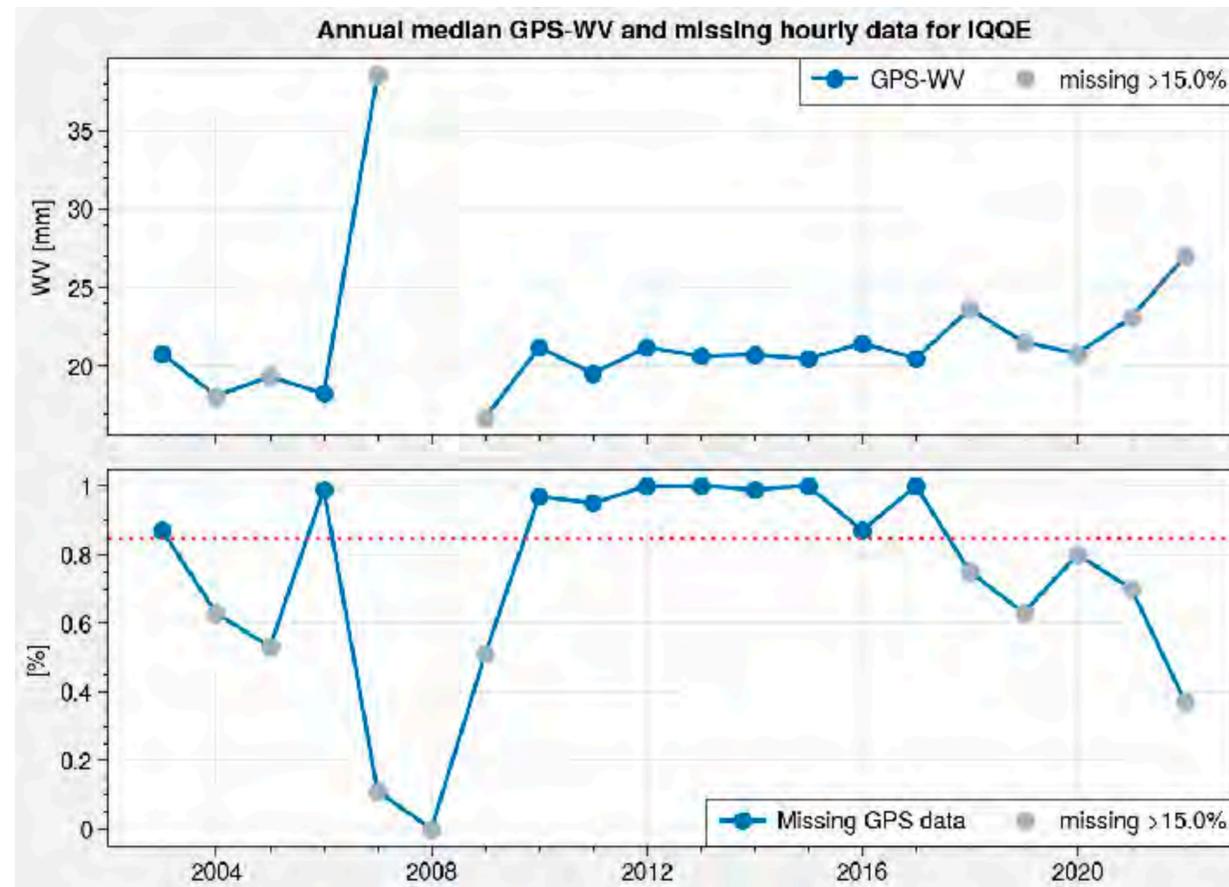
Líneas:

Filtro de Savitzky-Golay



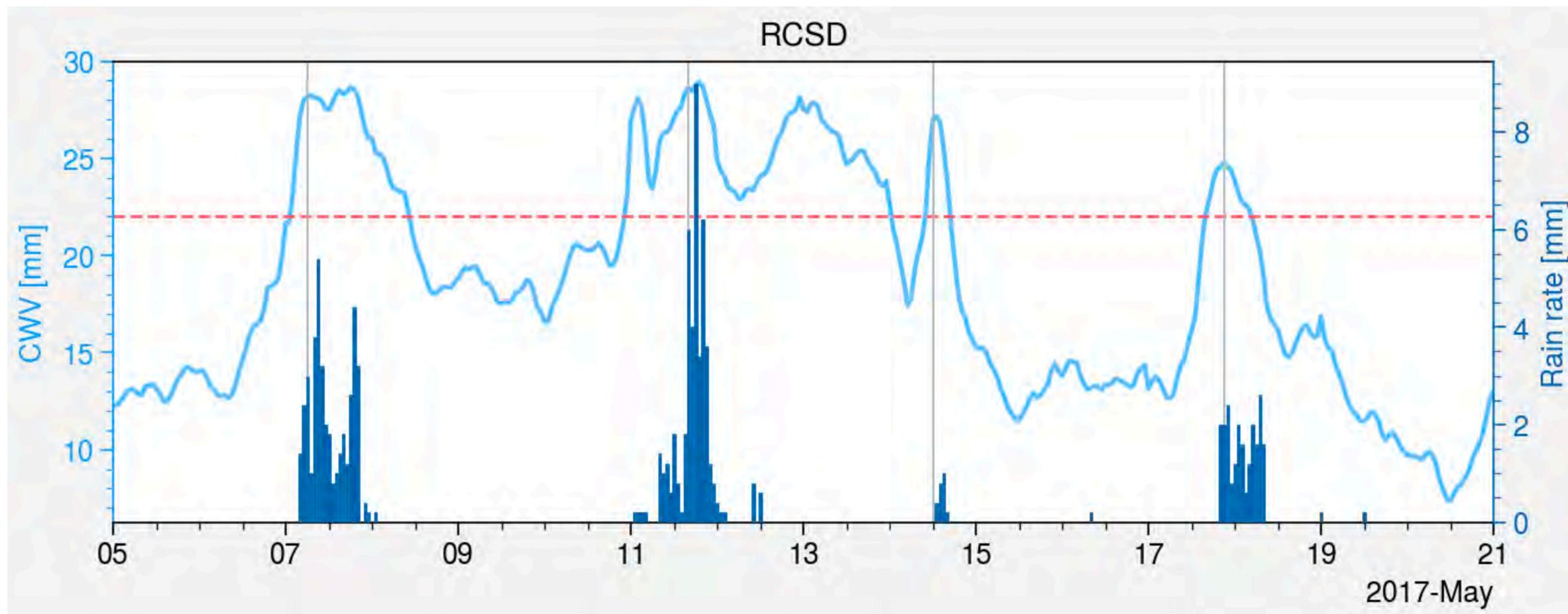
Imputación estocástica de WV

Para mejorar calidad de estadística (trabajo en progreso)



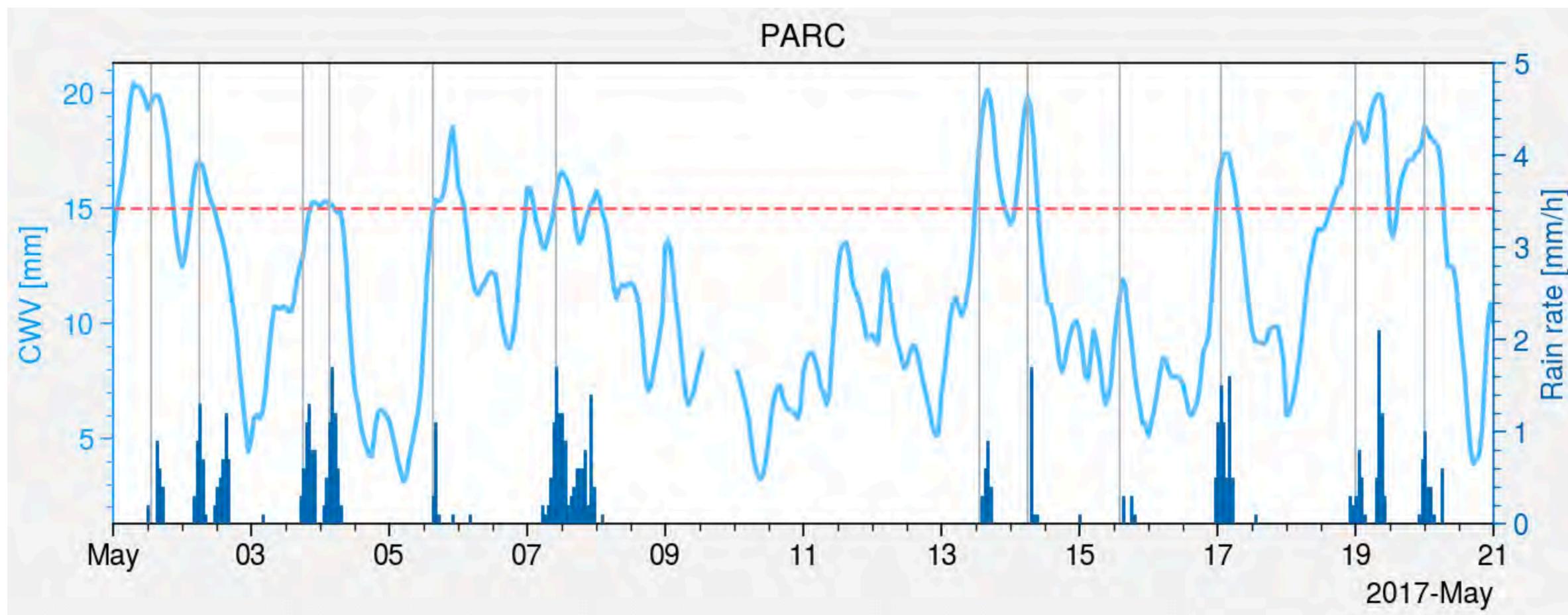
Serie de tiempo GPS-WV y precipitación

Resolución horaria



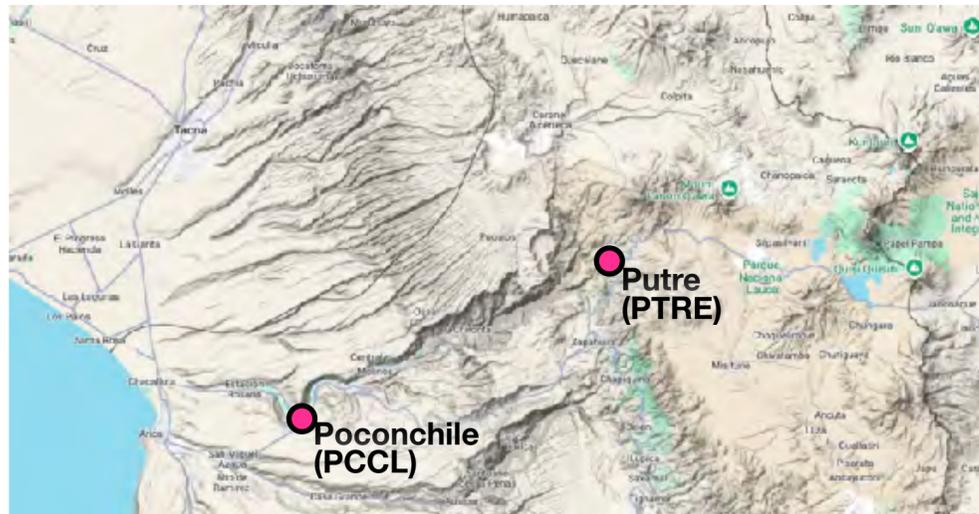
Serie de tiempo GPS-WV y precipitación

Resolución horaria

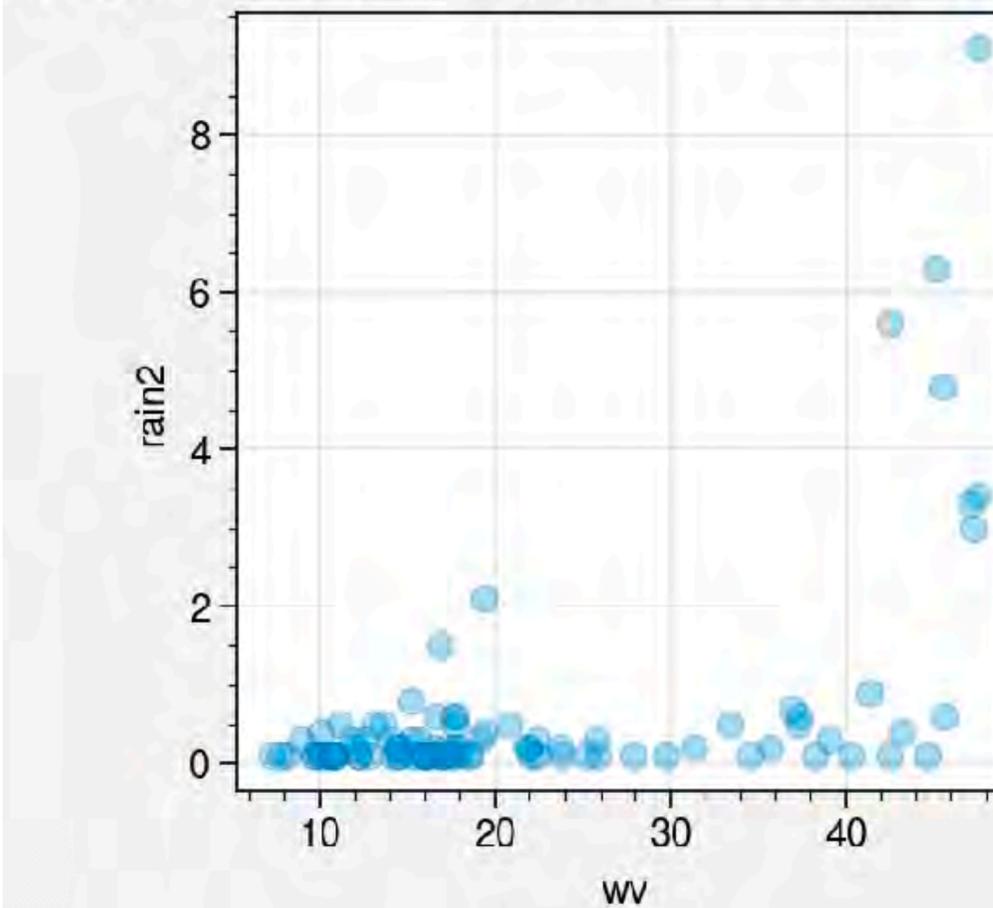


WV y precipitación a escala horaria

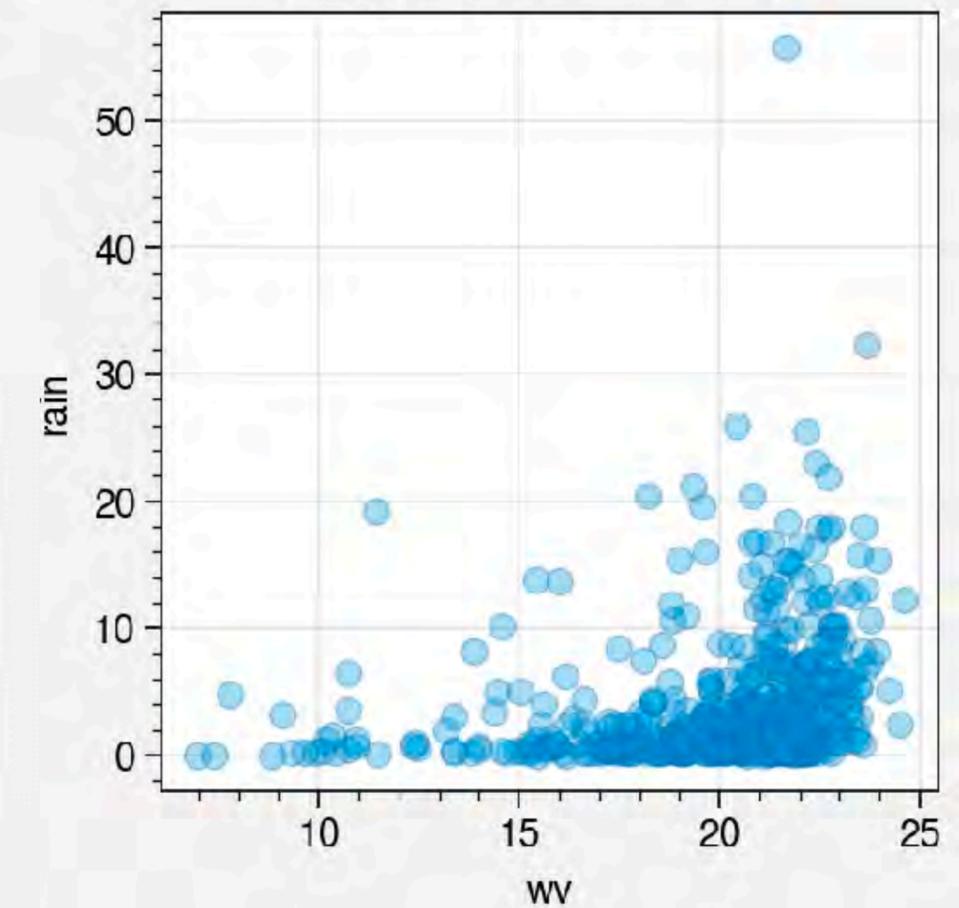
Poconchile (1144 msnm) y Putre (3608 msnm)



Daily rain at Poconchile (Lluta medio INIA) and WV at PCCL

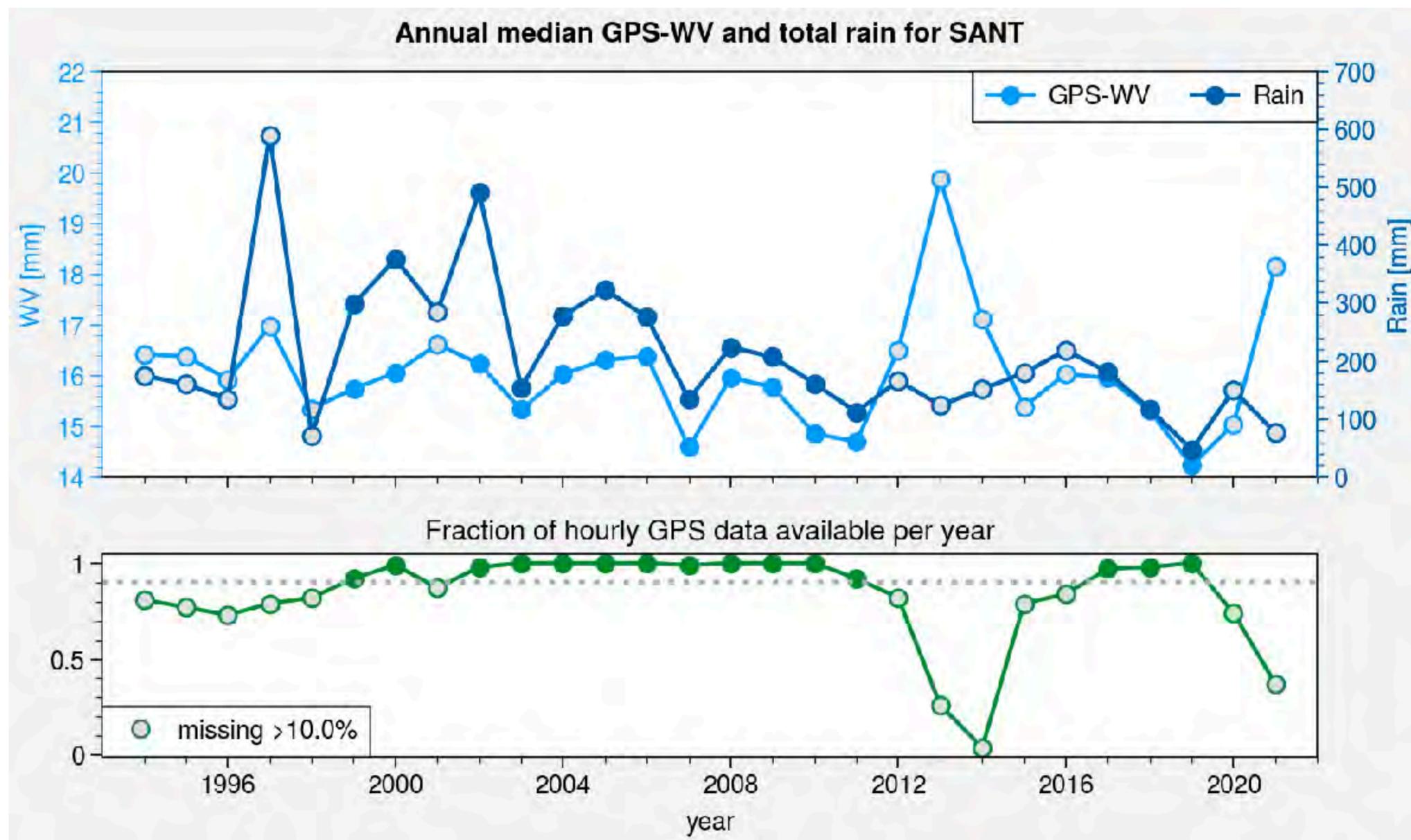
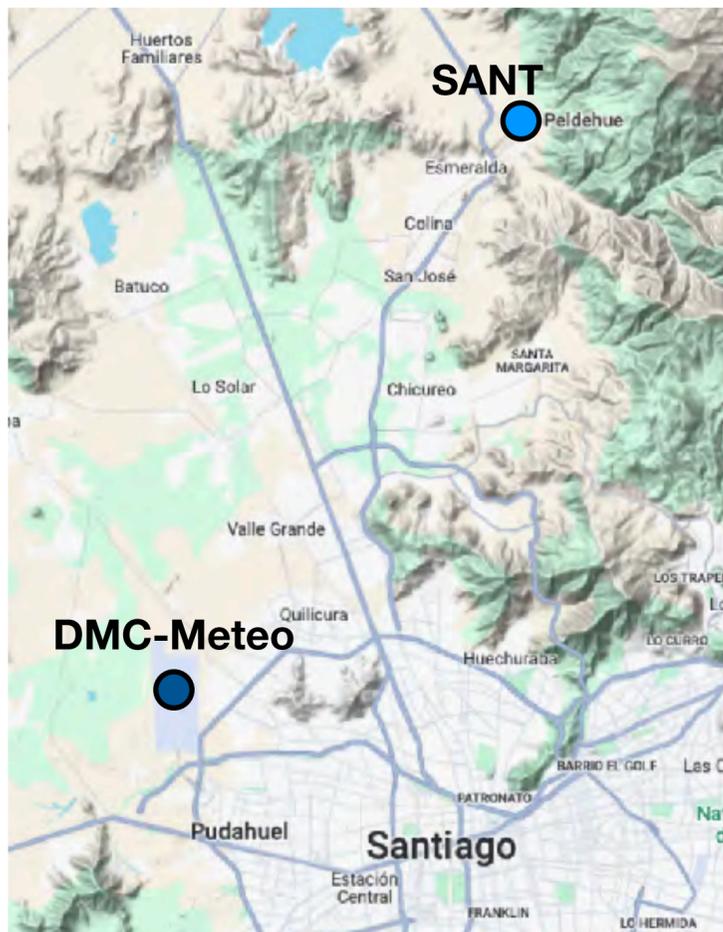


Daily rain and WV at PTRE



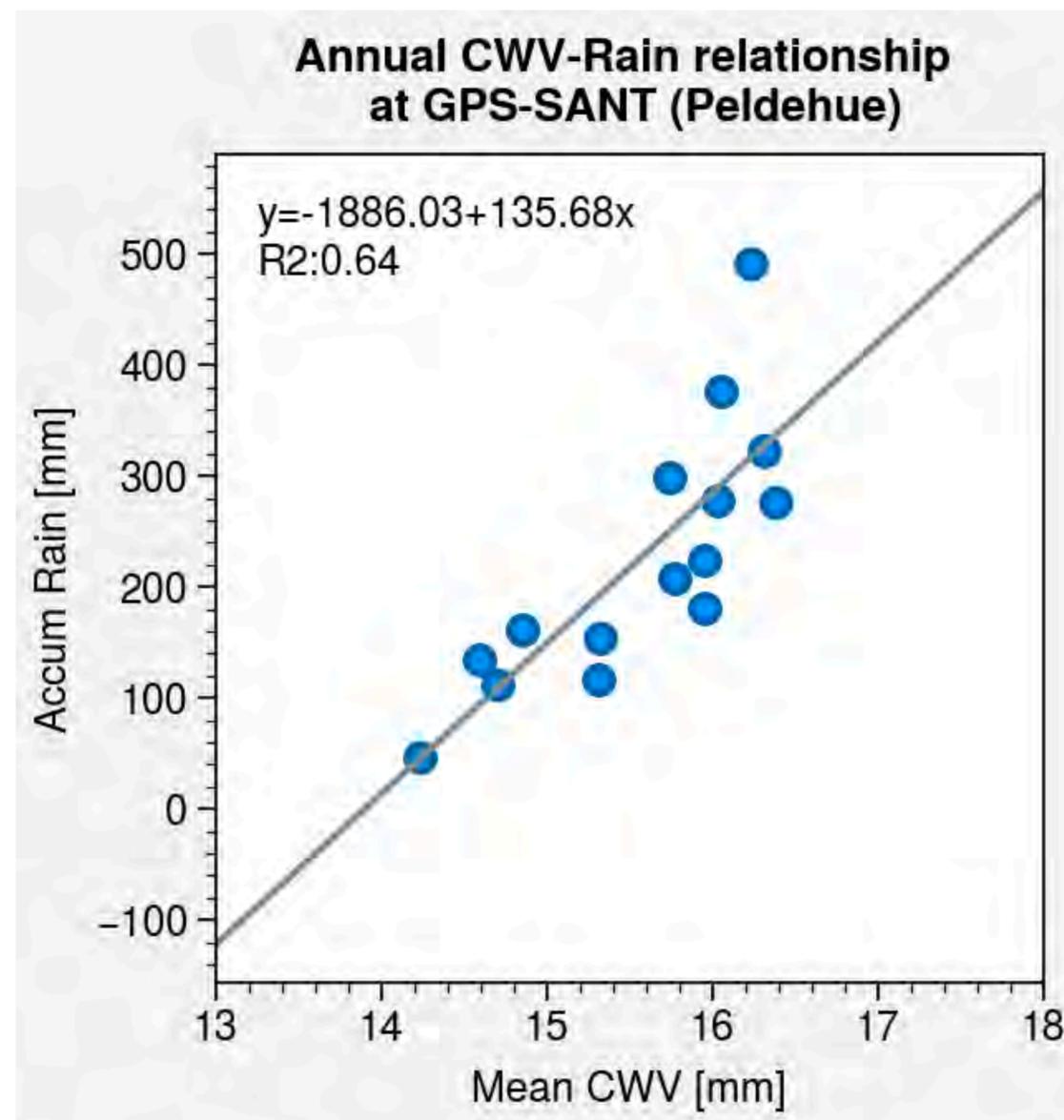
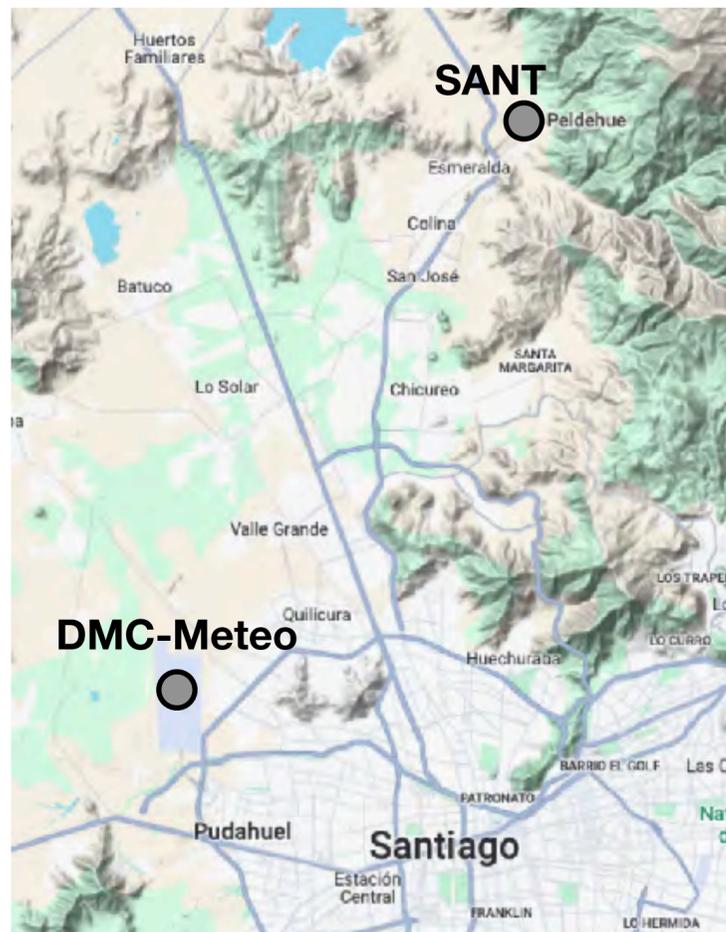
WV y precipitación a escala anual

Peldehue (700 msnm)



WV y precipitación a escala anual

Peldehue (700 msnm)



Conclusión

- Valores de ZTD obtenidos desde NGL permiten derivar de manera razonable CWV.
- CWV obtenido directamente de NGL con sesgo seco (se aconseja no utilizar).
- Fuerte variabilidad mensual de CWV (no-estacionaria) función de la localidad.
- Deseable aplicar técnicas de imputación para aprovechar al máximo dataset climático.
- Se observa correlación entre peaks de CWV y precipitación a nivel horario. Falta análisis exhaustivo.
- Se observa correlación entre promedio anual de CWV y precipitación anual. Potencial uso de CWV para estudiar precipitación en el futuro.



Center for Climate
and Resilience Research



Muchas gracias

raul.valenzuela@uoh.cl

7° Congreso de Oceanografía Física, Meteorología, y Clima del Pacífico Sur Oriental
4-6 Noviembre 2024 ♦ Iquique



Center for Climate
and Resilience Research

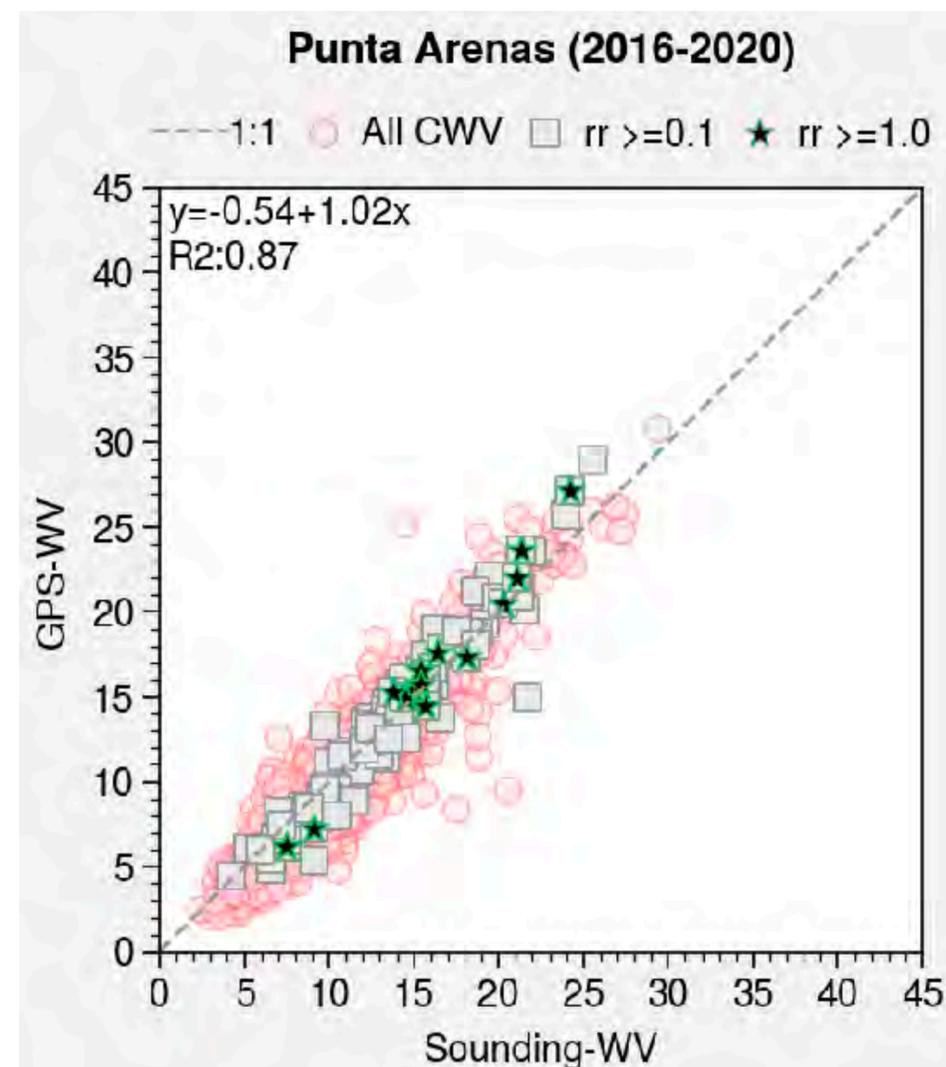
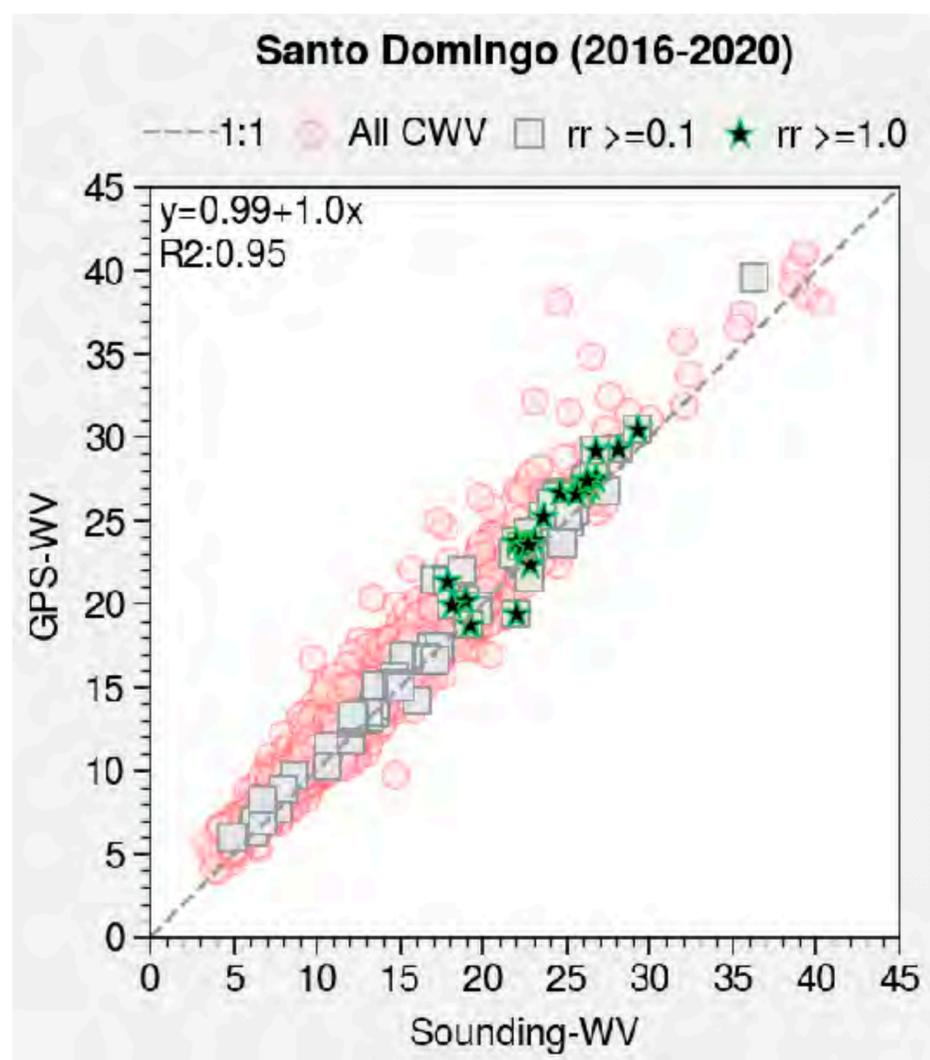


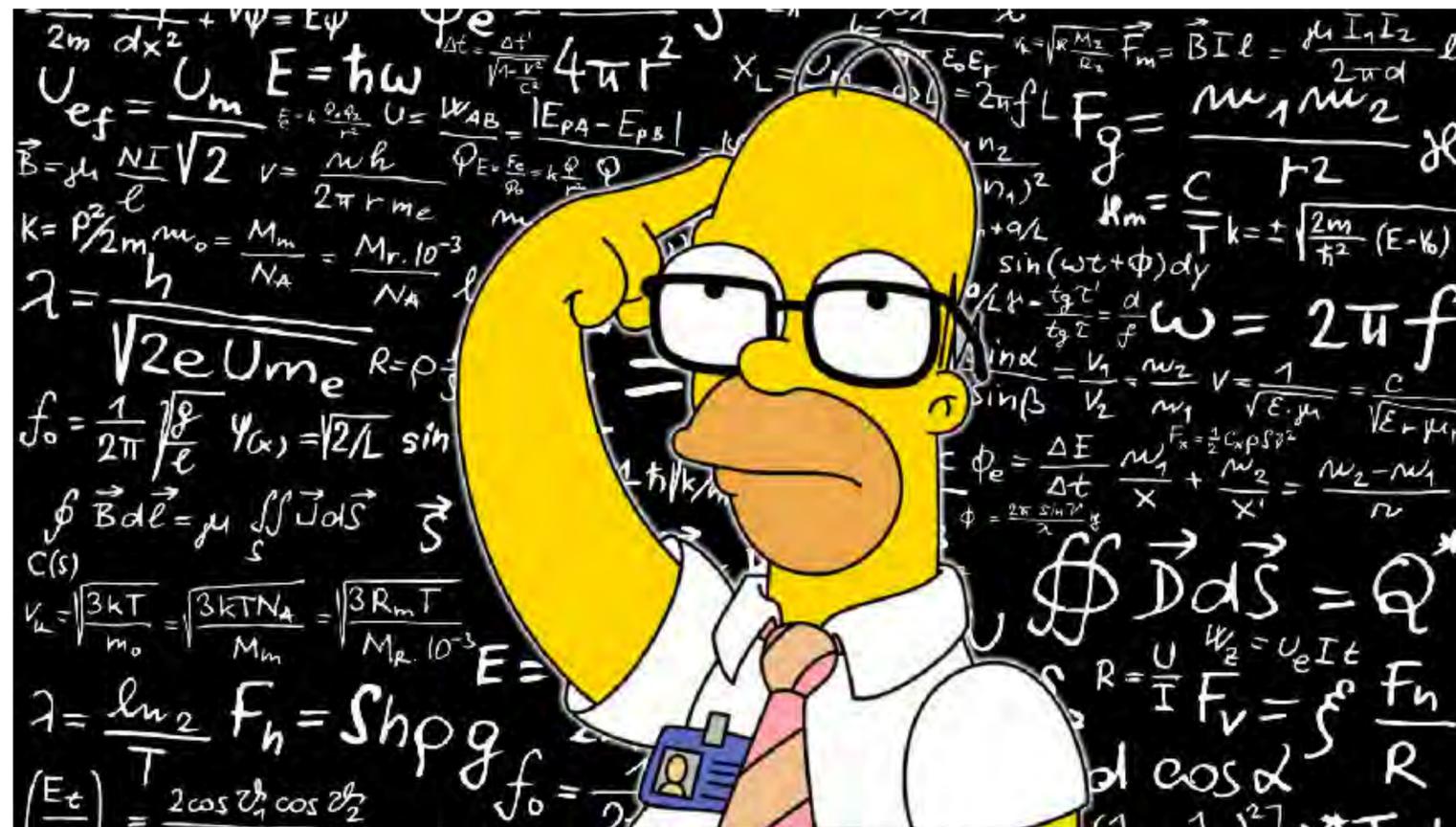
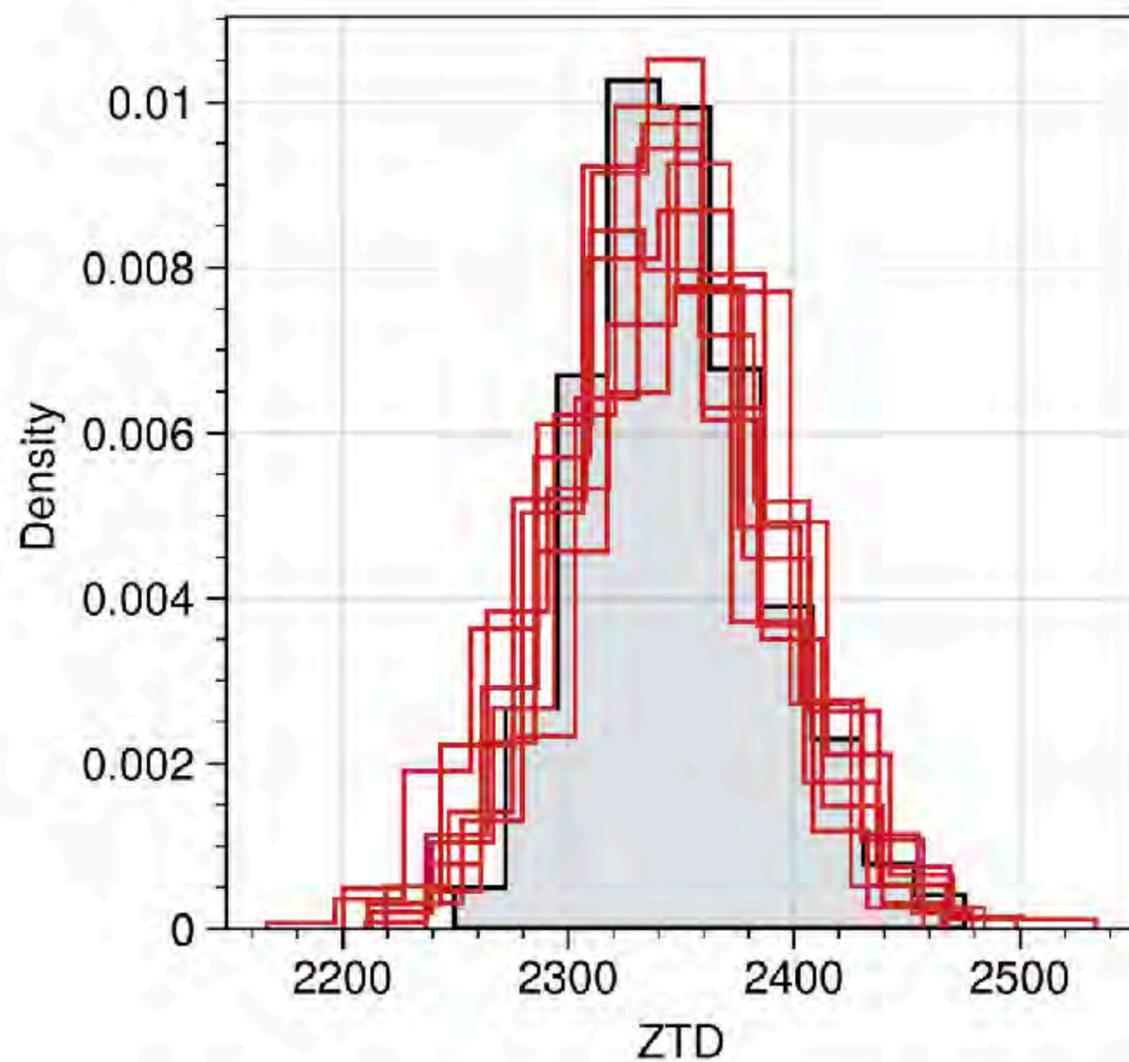
Backup

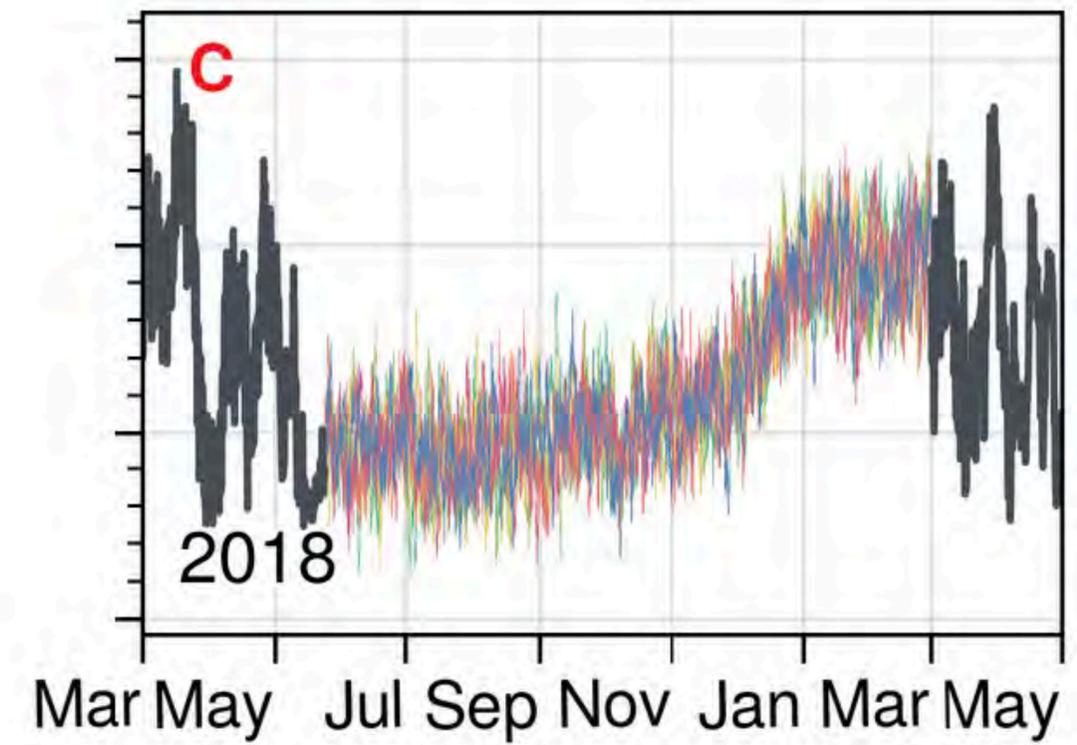
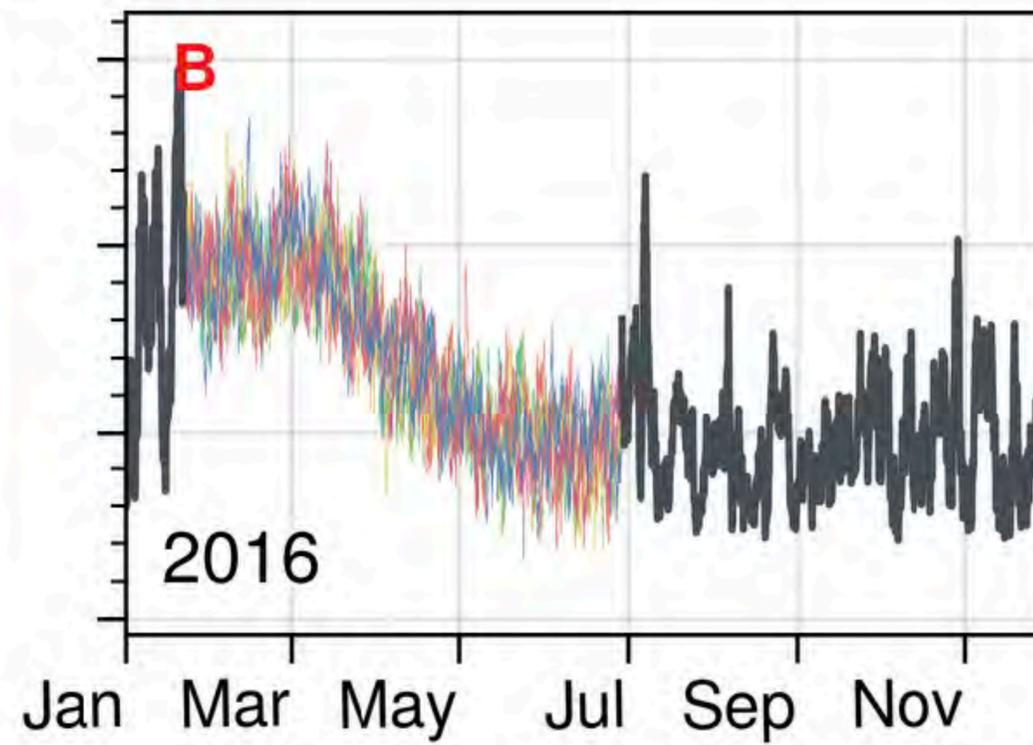
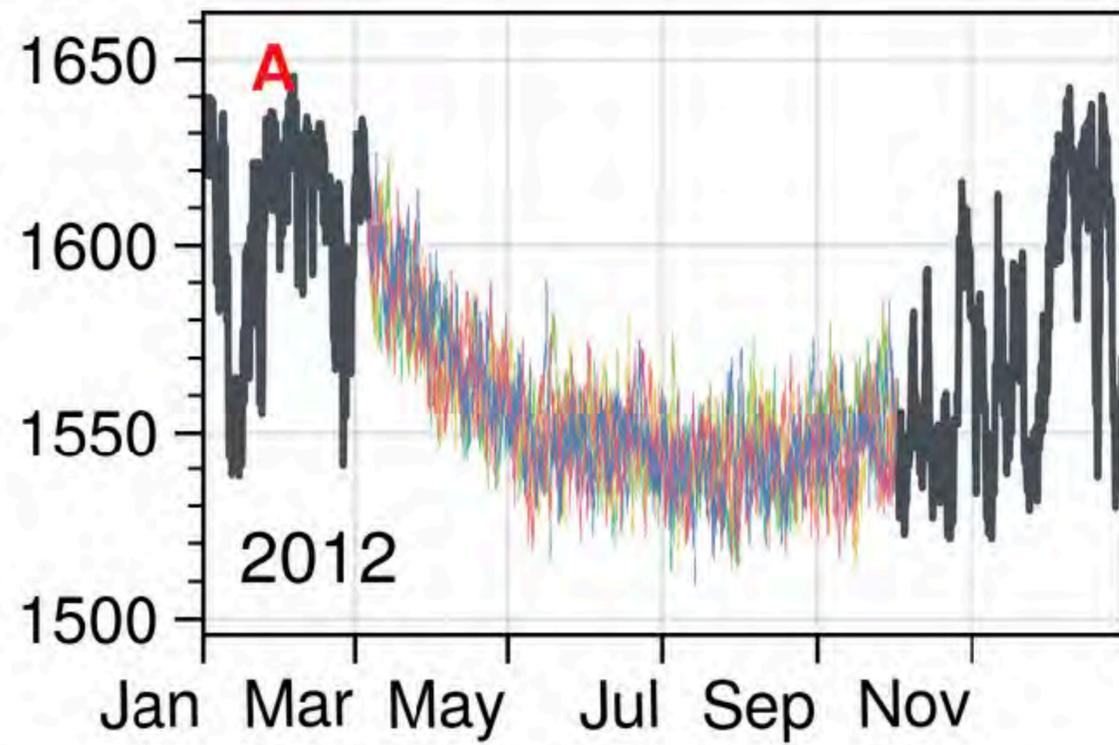
7° Congreso de Oceanografía Física, Meteorología, y Clima del Pacífico Sur Oriental
4-6 Noviembre 2024 ♦ Iquique

Validación GPS-WV con radiosonda

Valores radiosonda de IGRA, GPS con meteorología cercana







Algorithm 1 Expectation-Maximization for SDE driven process

Input Observed data \vec{X} , set of censored times \mathcal{I} , initial estimate θ_0 **Output** Estimated parameter θ , simulated missing data

repeat While θ does not converge

E-Step: Compute ν_{θ_0} , $p_{s,t}(x, y)$ and its gradient

if $0 \in \mathcal{I}$ **then** Define $X_0 \sim \nu_{\theta_0}$

for each interval $I \subset \mathcal{I}$ **do**

 With j the smallest upper bound of I , define for each $i \in I$

$$X_{t_i} = X_{t_{i-1}} + \left[b_{\theta}(X_{t_{i-1}}) + \sigma_{\theta}^{\top}(X_{t_{i-1}}) \sigma_{\theta}(X_{t_{i-1}}) \nabla p_{t_{i-1}, t_j}(X_{t_{i-1}}, X_{t_j}) \right] (t_i - t_{i-1}) + \sigma_{\theta}(X_{t_{i-1}}) Z_i \sqrt{t_i - t_{i-1}}$$

 If I is unbounded, define for each $i \in I$

$$X_{t_i} = X_{t_{i-1}} + b_{\theta}(X_{t_{i-1}})(t_i - t_{i-1}) + \sigma_{\theta}(X_{t_{i-1}}) Z_i \sqrt{t_i - t_{i-1}}$$

M-Step: Calculate empirical distribution of (observed and filled) X , $\mu_n := n^{-1} \sum_{i=1}^n \delta_{X_{t_i}}$ Update $\theta = \arg \min W_2(\nu_{\theta}, \mu_n)$

Distribución condicional de WV y precip

Santo Domingo (RCSD) y Punta Arenas (PARC)

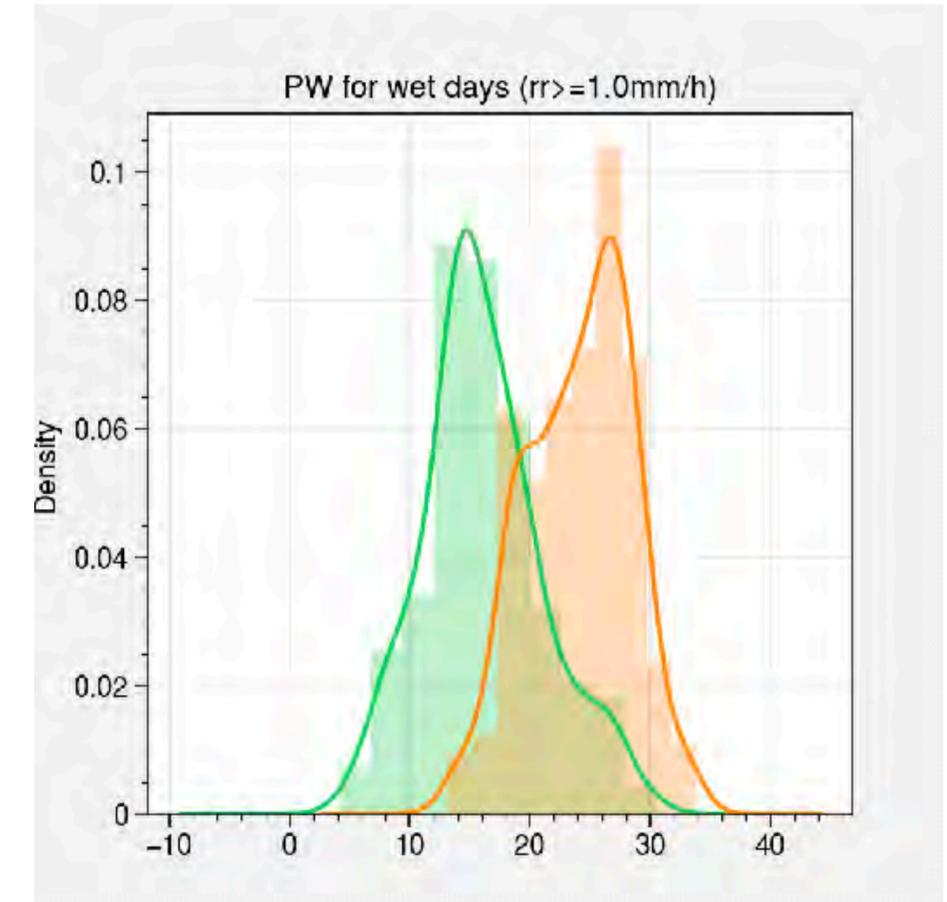
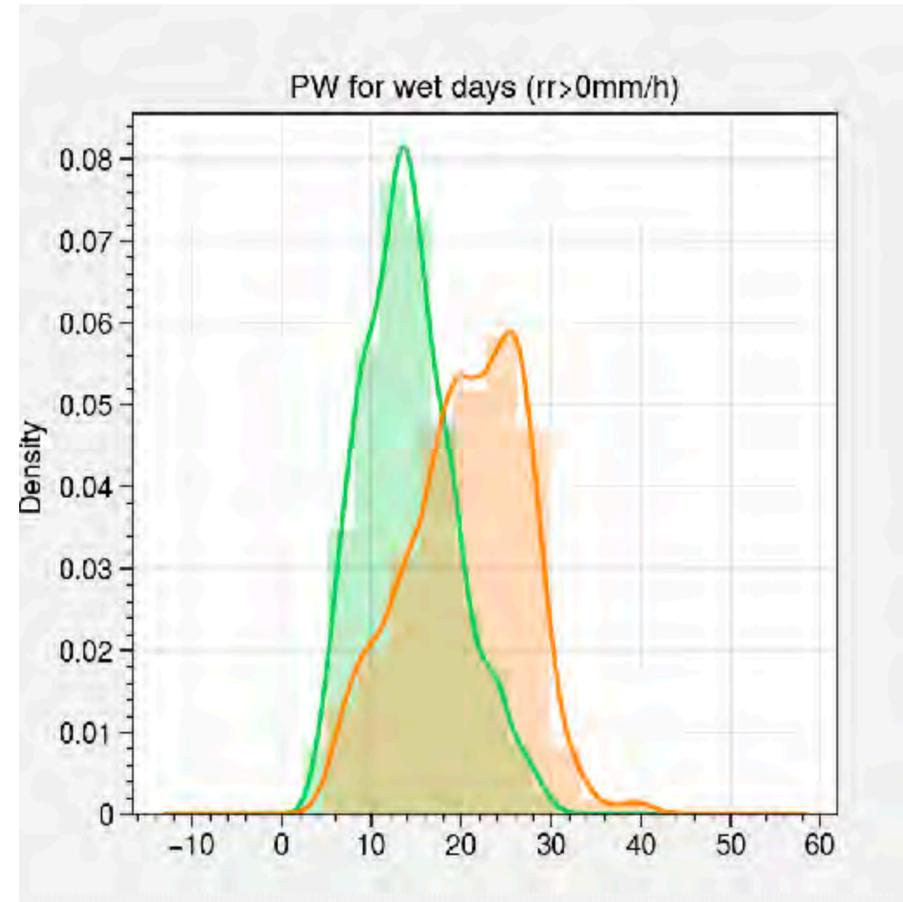
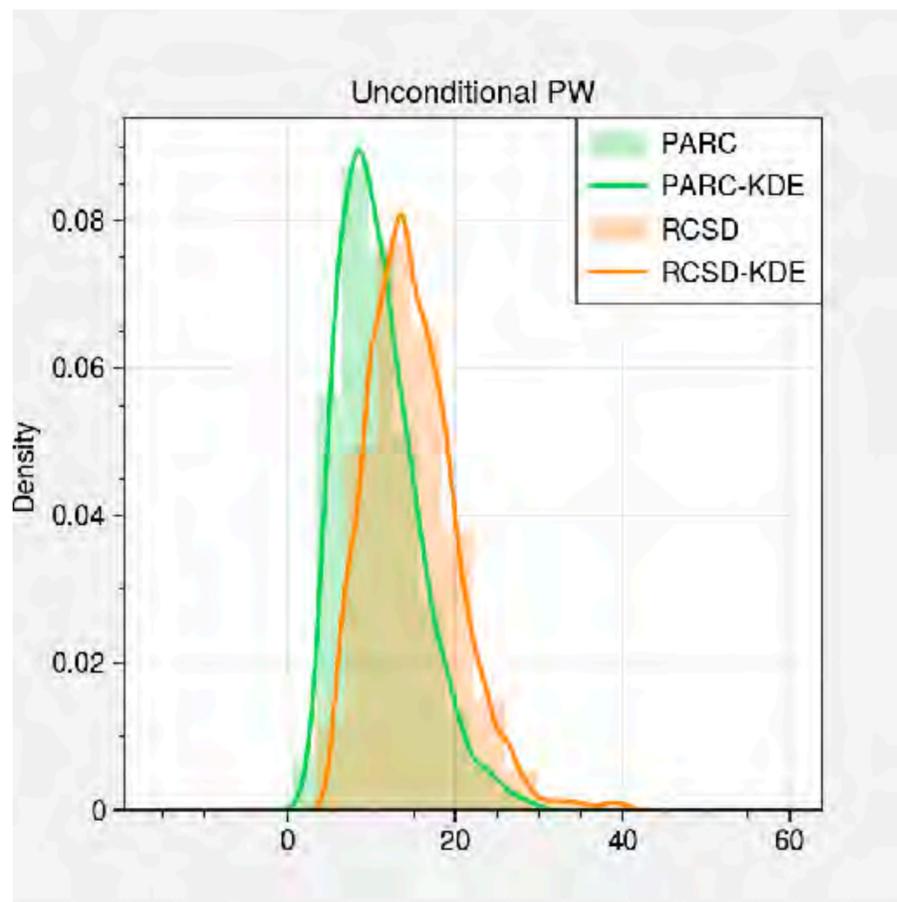


Table 1

| | lat | lon | hgt | nyears | beg | end |
|----------------|---------|---------|----------|--------|---------------------|---------------------|
| st_name | | | | | | |
| PTRE | -18.194 | -69.574 | 3608 | 16 | 2005-10-24 00:00:00 | 2021-05-04 23:55:00 |
| PCCL | -18.458 | -70.107 | 1144 | 16 | 2005-10-21 00:00:00 | 2021-05-05 23:55:00 |
| ATJN | -19.301 | -70.137 | 1598 | 16 | 2005-10-27 00:00:00 | 2021-05-05 23:55:00 |
| IQQE | -20.274 | -70.132 | 39 | 18 | 2002-01-09 00:05:00 | 2021-05-15 23:55:00 |
| CRSC | -20.918 | -70.080 | 1517.876 | 16 | 2005-11-10 12:35:00 | 2021-05-05 23:55:00 |
| CDLC | -22.190 | -69.762 | 1998.285 | 15 | 2006-10-05 16:40:00 | 2020-10-16 23:55:00 |
| CBAA | -22.746 | -68.448 | 3514.857 | 15 | 2006-10-01 17:25:00 | 2021-05-05 23:55:00 |
| JRGN | -23.289 | -70.575 | 327.590 | 16 | 2005-11-06 00:00:00 | 2021-05-05 23:55:00 |
| CFAG | -31.602 | -68.233 | 702.582 | 16 | 1995-11-10 13:30:00 | 2010-12-13 23:55:00 |
| MZAC | -32.895 | -68.876 | 859.855 | 17 | 2004-06-02 13:50:00 | 2021-05-15 23:55:00 |
| SANT | -33.150 | -70.669 | 723.064 | 27 | 1994-01-02 00:00:00 | 2021-05-15 23:55:00 |
| ANTC | -37.339 | -71.532 | 745.383 | 19 | 2002-01-01 00:05:00 | 2021-05-15 23:55:00 |
| COYQ | -45.514 | -71.892 | 476.177 | 22 | 1999-01-14 00:05:00 | 2020-01-26 23:55:00 |
| PARC | -53.137 | -70.880 | 22.307 | 22 | 1999-01-01 00:05:00 | 2021-05-15 23:55:00 |
| RIO2 | -53.785 | -67.751 | 32.013 | 22 | 1999-06-10 00:00:00 | 2021-05-08 23:55:00 |
| AUTF | -54.840 | -68.304 | 71.902 | 21 | 1999-01-01 00:05:00 | 2021-05-15 23:55:00 |