



Metodología de validación, cálculo de estadísticos y relleno para registros meteorológicos

Emitido por

Camila M. Zúñiga Cárcamo, M.Sc.

Líder de Reportabilidad Ambiental.

Superintendencia de Reportabilidad Ambiental y Seguimiento Hidrogeológico (RAySH).

Gerencia Hidrogeología (GHS)

Junio 2025

Control de versiones**Fecha****Versión 0**

Junio 2025



Tabla de contenido

Índice de Figuras.....	3
Índice de Tablas.....	3
1. Introducción	4
2. Objetivo	5
3. Alcances.....	5
4. Red de monitoreo meteorológico	6
5. Metodología de validación	7
5.1. Observaciones en terreno y periodos de mantención.....	8
5.2. Rango/límite de medición de cada sensor	8
5.3. Rango/límite físico de las variables	9
5.3.1. Medición de evaporación mediante el uso de bandejas de evaporación Clase A 10	
5.3.2. Presión atmosférica.....	11
5.3.3. Temperatura del aire	11
5.3.4. Velocidad del viento	12
5.4. Condiciones operaciones excepcionales	13
5.4.1. Falla de sistema de relleno automático del pan de evaporación y/o configuración de sensor de presión.	13
5.4.2. Condiciones climáticas	15
5.4.3. Sombras proyectadas sobre el piranómetro.....	17
5.5. Valores atípicos (<i>outliers</i>).....	17
6. Cálculos de estadísticos	17
7. Metodología de relleno	18
7.1. Relleno mediante correlación lineal	19
7.2. Relleno de precipitación	19
8. Conclusión	19
9. Referencias	20



Índice de Figuras

Figura 1: Relleno constante en estación meteorológica SOP en comparación con la variación del nivel de agua en la bandeja de evaporación de KCL.....	14
Figura 2: Partículas de acero encontradas en la manguera de conexión entre el bin y pan de evaporación en estación meteorológica	15
Figura 3: Registro anómalo medido por el sensor de nivel en el pan de evaporación de estación meteorológica Chaxa.	16
Figura 4: Medición de la columna de agua en las bandejas de evaporación de las estaciones LZA9-1 (Interna) y KCL.	16
Figura 5: Registro bruto de radiación global desde el 25 al 26 de octubre en las estaciones Chaxa, SOP y KCL.	17

Índice de Tablas

Tabla 1: Variables meteorológicas y unidades de medidas.....	6
Tabla 2: Variables meteorológicas registradas por estación.	6
Tabla 3: Variables meteorológicas registradas por estación (continuación).	7
Tabla 4: Límite de rango de valores aceptado en manual de instrucciones por sensor.	9
Tabla 5: Límites inferior y superior físico de las variables	13
Tabla 6: Estadísticos diarios calculados por variable	18



1. Introducción

SQM mantiene en el Salar de Atacama una red de monitoreo de variables meteorológicas, compuesta, a junio del 2025, por 18 estaciones, distribuidas estratégicamente en el territorio. Los datos recolectados por esta red son fundamentales para estudios climáticos, hidrológicos e hidrogeológicos del sector, aportando al entendimiento de la operación, a los estudios ambientales y a la reportabilidad comprometida con la Autoridad.

Los registros meteorológicos obtenidos presentan, en general, parámetros medidos correctamente en el tiempo. Sin embargo, pueden presentarse anomalías que deben ser invalidadas para su correcta interpretación. Estas anomalías pueden deberse a diversas causas, como la manipulación de los instrumentos durante visitas de mantención, interferencias en los sensores (por ejemplo, la cobertura del piranómetro por sombras proyectadas por infraestructuras cercanas), acumulación de suciedad en los equipos, o condiciones no adecuadas para la medición, como la presencia de agua congelada o ausencia de agua en el pan de evaporación, entre otras.

Contar con registros validados y con estadísticas diarias como el promedio, mínimo o máximo diario de una variable meteorológica permite realizar análisis más robustos y representativos del comportamiento climático. Estos indicadores son esenciales para identificar tendencias, evaluar condiciones extremas, y respaldar decisiones operacionales y ambientales con base en datos confiables. Para calcular estadísticos diarios, como el promedio diario, es necesario contar con un porcentaje representativo de datos por variable. En este caso, se ha definido que dicho umbral sea del 95%. Cuando este porcentaje no se alcanza, se debe estimar el valor correspondiente considerando los registros capturados por estaciones aledañas y las series históricas disponibles.

En este contexto, se desarrolla una metodología de validación, relleno y cálculo de estadísticos diarios representativos para facilitar el análisis de las variables meteorológicas y asegurar la calidad de los datos utilizados en los distintos procesos de evaluación y reporte.

Este procedimiento de validación y relleno de datos meteorológicos es aplicable tanto a las estaciones actualmente operativas como a aquellas que se incorporen en el futuro a la red de monitoreo. En caso de que se integren nuevas variables o se realicen modificaciones en los sensores utilizados para el registro de datos, la metodología deberá ser actualizada oportunamente, de modo que refleje adecuadamente las condiciones de medición y los criterios de validación correspondientes.

Es importante considerar que, en el caso de estaciones nuevas, el proceso de relleno de datos puede presentar limitaciones debido a la ausencia de registros históricos suficientes que permitan establecer correlaciones estadísticas robustas con otras estaciones de la red. Por lo tanto, en estos casos se recomienda aplicar el procedimiento con especial cautela, documentando las decisiones adoptadas y evaluando rigurosamente la confiabilidad de los datos interpolados.



2. Objetivo

El presente documento tiene por objetivo establecer una metodología técnica para la validación de registros meteorológicos provenientes de la red de estaciones meteorológicas de SQM ubicadas en el Salar de Atacama. Esta metodología contempla la aplicación de criterios sistemáticos para la identificación de registros inválidos, el cálculo de estadísticos diarios —como promedios, máximos y mínimos— y el procedimiento de relleno para aquellas variables que no cuenten con al menos un 95% de registros validados requeridos para dicho cálculo.

3. Alcances

Los resultados obtenidos a partir del proceso de validación de datos meteorológicos, en particular aquellos que evidencien invalidaciones frecuentes o significativas en una o más estaciones, deberán ser informados al equipo de instrumentación. Esta retroalimentación permitirá evaluar la funcionalidad de los sensores involucrados, determinar la necesidad de realizar mantenciones, reemplazos de equipos o implementar otras acciones correctivas que aseguren la continuidad y calidad del monitoreo.

Este procedimiento aplica al personal del área de Reportabilidad Ambiental de la Superintendencia de Reportabilidad Ambiental y Seguimiento Hidrogeológico (RAySH), parte de la Gerencia de Hidrogeología de SQM, quienes son responsables de:

- Ejecutar las validaciones de los registros meteorológicos mediante herramientas manuales, semi-automáticas o automáticas.
- Revisar los resultados de la validación.
- Ejecutar herramientas automatizadas para el cálculo de estadísticos diarios (como promedios, máximos y mínimos) y aplicar metodologías de relleno cuando corresponda.
- Informar a el equipo de instrumentación de cualquier desviación relevante.

Queda expresamente fuera del alcance de este procedimiento la descripción detallada del funcionamiento o diseño de las herramientas de automatización utilizadas para implementar las metodologías aquí expuestas.

Es responsabilidad del equipo de instrumentación recibir los comentarios derivados del proceso de validación, analizarlos y ejecutar las acciones necesarias para garantizar el correcto funcionamiento de las estaciones meteorológicas.

Este procedimiento no requiere actualización en caso de que se incorporen nuevas estaciones a la red. No obstante, sí deberá ser actualizado en caso de que se integren nuevos sensores o se comiencen a registrar nuevas variables meteorológicas, de modo que se asegure la correcta aplicación de los criterios de validación y tratamiento de datos.

4. Red de monitoreo meteorológico

La red de monitoreo meteorológico de SQM en el Salar de Atacama está compuesta actualmente por **18 estaciones**, distribuidas estratégicamente en distintos puntos de la cuenca. Las variables registradas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Variables meteorológicas y unidades de medidas.

Variable	Nombre abreviado en base de datos	Unidad
Precipitación	Prec	mm
Temperatura del aire	Taire	°C
Nivel de bandeja	NivelPan1	mm
Humedad relativa	HR	%
Presión atmosférica	PresAtm	mbar
Radiación Solar Global	RadGlo	W/m ²
Velocidad del viento	VelVto	m/s
Dirección del viento	DirVto	° sexagesimales
Temperatura del agua	Tagua	°C

En las siguientes tablas se presenta el detalle de las variables meteorológicas registradas por cada estación. Esta información permite identificar la cobertura de variables en cada punto de monitoreo.

Tabla 2: Variables meteorológicas registradas por estación.

Estación	Precipitación	Temperatura del aire	Humedad relativa	Presión atmosférica	Radiación global	Velocidad del viento	Dirección del viento	Evaporación
Chaxa	●	●	●	●	●	●	●	●
KCL	●	●	●	●	●	●	●	●
SOP	●	●	●	●	●	●	●	●
Cordillera de la Sal	●	●	●	●	●	●	●	●
LZA3-1 (Quelana)	●	●	●	●	●	●	●	●
LZA3-2	●	●	●	●	●	●	●	
LZA3-3	●	●	●	●	●	●	●	
LZA7-1	●	●	●	●	●	●	●	
LZA7-2	●	●	●	●	●	●	●	
LZA9-1 (Interna)	●	●	●	●	●	●	●	●
LZA10-1	●	●	●	●	●	●	●	
LZA12-1	●	●	●	●	●	●	●	
LZA12-2	●	●	●	●	●	●	●	

Tabla 3: Variables meteorológicas registradas por estación (continuación).

Estación	Precipitación	Temperatura del aire	Humedad relativa	Presión atmosférica	Radiación global	Velocidad del viento	Dirección del viento	Evaporación
LZA12-3	●	●	●	●	●	●	●	
Cerro Cosor	●	●	●	●	●	●	●	
Domeyko	●	●	●	●	●	●	●	
Llano de la Paciencia	●	●	●	●	●	●	●	
El Tatio	●	●	●	●	●	●	●	

Entre los meses de marzo y mayo de 2025, se realizó una actualización de infraestructura en las estaciones meteorológicas con el objetivo de homogeneizar el conjunto de variables registradas. A partir de esta intervención, todas las estaciones comenzaron a medir las mismas variables: precipitación, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, radiación global, velocidad del viento y dirección del viento. Esta actualización se ejecutó en el marco de la Acción 16 del Programa de Cumplimiento (PdC), correspondiente al proceso sancionatorio ROL F-041-2016 de la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA).

Cabe señalar que esta estandarización no incluyó la variable evaporación, debido a que su monitoreo requiere infraestructura adicional que excede el espacio disponible en las estaciones que originalmente no contaban con esta medición.

5. Metodología de validación

La validación de los datos meteorológicos registrados por las estaciones de la red SQM se basa en la aplicación de criterios técnicos que permiten identificar registros anómalos y asegurar la calidad de la información utilizada en reportes y análisis ambientales, climáticos e hidrogeológicos.

El proceso de validación considera una revisión sistemática de los datos, con énfasis en la detección de inconsistencias, errores instrumentales o condiciones externas que puedan afectar la representatividad de las mediciones. Para ello, se aplican los siguientes criterios:

- Observaciones en terreno y periodos de mantención.
- Rango/límite de medición de cada sensor.
- Rango/límite físico de las variables.
- Condiciones operacionales excepcionales.
- Valores atípicos.

	<p style="text-align: center;">GHS-RAySH-M002</p> <p style="text-align: center;">Metodología de validación, cálculo de estadísticos y relleno para registros meteorológicos</p>	<p>Versión 00 Página 8 de 21</p>
--	---	--------------------------------------

En las siguientes secciones, cada uno de estos criterios será abordado de manera puntual, detallando su fundamento técnico, aplicación práctica y ejemplos representativos.

5.1. Observaciones en terreno y periodos de mantención

Este criterio se basa en la revisión de las fichas de terreno o *check lists* completadas por el equipo de instrumentación durante las visitas programadas a las estaciones meteorológicas. En estos registros se documenta el estado de los sensores, las intervenciones realizadas y cualquier condición externa que pueda haber afectado la calidad de los datos.

Un aspecto clave de este criterio es la verificación del funcionamiento del pluviómetro, la cual se realiza mediante equipos diseñados para simular eventos de lluvia. Durante estas pruebas, se registra la cantidad de pulsos generados por el pluviómetro, considerando que un pulso equivale a 0,1 mm de precipitación. Toda precipitación simulada durante estas pruebas debe ser invalidada, ya que no corresponde a un evento meteorológico real.

Asimismo, cualquier intervención que implique la limpieza, reemplazo o ajuste de sensores debe ser registrada y considerada como potencial fuente de alteración en los datos. En estos casos, los registros asociados también deben ser evaluados y, si corresponde, clasificados como inválidos.

Este criterio debe aplicarse de forma sistemática para todas las estaciones y variables, como parte del proceso de aseguramiento de calidad de los datos meteorológicos.

5.2. Rango/límite de medición de cada sensor

Este criterio tiene como propósito verificar que los valores registrados por cada sensor se encuentren dentro del rango operativo especificado por el fabricante. Para su correcta aplicación, es indispensable contar con los manuales técnicos de los instrumentos instalados en cada estación meteorológica, los cuales definen los límites mínimos y máximos de medición aceptables para cada variable (Tabla 4).

El análisis consiste en comparar cada registro con el rango de funcionamiento declarado para el sensor correspondiente. Si el valor se encuentra dentro de dicho rango, el dato se etiqueta como potencialmente válido. En caso contrario, se clasifica como no válido, ya que representa una condición fuera de los límites instrumentales, lo que puede deberse a fallas técnicas, errores de lectura o condiciones extremas no representativas del entorno real.

Es importante destacar que este criterio corresponde a una validación por bandas de primer orden, basada exclusivamente en los rangos operacionales declarados por el fabricante. Por lo tanto, su aplicación permite identificar y descartar registros evidentemente anómalos, pero no garantiza por sí sola la validez del dato. Es decir, un valor dentro del rango del sensor no implica necesariamente que sea confiable o representativo de las condiciones ambientales reales.

Para una validación más robusta, es necesario complementar este criterio con una evaluación contextual de las condiciones de instalación y operación de los sensores, lo cual se aborda en

la sección de “Rango/Límite Físico de las Variables”. Esta evaluación considera aspectos como la geometría de los equipos, la ubicación del sensor, y el comportamiento histórico de la variable, permitiendo acotar aún más los límites de validación y mejorar la calidad del proceso de aseguramiento de datos.

Tabla 4: Límite de rango de valores aceptado en manual de instrucciones por sensor.

Estación meteorológica	Variable	Manual técnico	Rango Sensor	Unidad
Cordillera de la Sal, LZA3-1 (Quelana), LZA9-1 (Interna), Chaxa, KCL, SOP	Bandeja (Sensor de presión)	InSitu LevelTroll 500 venteado (In-Situ, 2023)	0 – 3.000	mm
	Precipitación	Texas TR 525-M-10 (Texas Electronics Inc, 2024)	0 – 700	mm/hora
	Humedad Relativa	OTT Lufft WS-502 (OTT HydroMet)	0 – 100	%
	Presión atmosférica	OTT Lufft WS-502	300 – 1.200	mbar
	Radiación Global	OTT Lufft WS-502	0 – 2.000	W/m2
	Temperatura del aire	OTT Lufft WS-502	-50 – 60	°C
	Dirección del viento	OTT Lufft WS-502	0 - 360	°
	Velocidad del viento	OTT Lufft WS-502	0 – 75	m/s
LZA3-2, LZA3-3, LZA7-1, LZA7-2, LZA10-1, LZA12-1, LZA12-2 y LZA12-3	Precipitación	Texas TR 525-M-10	0 – 700	mm/hora
	Humedad Relativa	OTT Lufft WS-502	0 – 100	%
	Presión atmosférica	OTT Lufft WS-502	300 – 1.200	mbar
	Radiación Global	OTT Lufft WS-502	0 – 2.000	W/m2
	Temperatura del aire	OTT Lufft WS-502	-50 – 60	°C
	Dirección del viento	OTT Lufft WS-502	0 - 360	°
	Velocidad del viento	OTT Lufft WS-502	0 – 75	m/s

5.3. Rango/límite físico de las variables

A diferencia del criterio anterior, que se basa exclusivamente en los rangos operacionales definidos por los fabricantes de los sensores, esta sección incorpora una validación complementaria que considera las condiciones reales de instalación y operación de las estaciones meteorológicas en el Salar de Atacama.

El Salar de Atacama presenta características ambientales únicas —como alta radiación solar, baja humedad relativa, grandes oscilaciones térmicas diarias y presencia de polvo salino—

	<p style="text-align: center;">GHS-RAySH-M002</p> <p style="text-align: center;">Metodología de validación, cálculo de estadísticos y relleno para registros meteorológicos</p>	<p>Versión 00 Página 10 de 21</p>
--	---	---------------------------------------

que pueden influir en el comportamiento de los sensores y en la interpretación de los datos registrados. Por ello, es necesario establecer límites físicos de validación que reflejen no solo la capacidad técnica de los instrumentos, sino también las condiciones esperadas y razonables para cada variable en este entorno específico.

Este criterio permite acotar los valores válidos a partir de:

- La geometría de los dispositivos de medición (por ejemplo, altura útil de bandejas de evaporación o tanques de lisímetros).
- El comportamiento histórico de las variables en estaciones representativas.
- La experiencia operativa acumulada en el monitoreo ambiental del salar.

En consecuencia, un dato puede encontrarse dentro del rango declarado por el fabricante y aun así ser considerado no válido si excede los límites físicos definidos para el entorno local. Esta validación es especialmente relevante para variables como evaporación, nivel de bandeja, temperatura del agua o radiación neta, donde las condiciones del sitio pueden generar sesgos o registros atípicos que deben ser filtrados para asegurar la calidad de la información.

Este enfoque permite fortalecer el proceso de aseguramiento de datos, adaptando los criterios de validación a la realidad operativa del monitoreo ambiental en el Salar de Atacama.

Para las variables humedad relativa, radiación solar global y dirección del viento, se aplicarán exclusivamente los rangos definidos por el fabricante del sensor como criterio de validación. Esta decisión se basa en la baja incidencia de sesgos significativos asociados a condiciones locales en estas variables, lo que permite confiar en los límites técnicos como umbral suficiente para asegurar la calidad de los datos.

A continuación, se detallan los límites de validación aplicables a variables específicas, considerando tanto criterios técnicos como condiciones locales.

5.3.1. Medición de evaporación mediante el uso de bandejas de evaporación Clase A

La validación del nivel de bandeja de evaporación se basa en las restricciones físicas del instrumento y en las condiciones ambientales del Salar de Atacama. Se utiliza una bandeja clase A con una altura máxima de 250 mm, valor que se define como límite superior absoluto. Cualquier registro que supere este valor debe ser invalidado por exceder la capacidad física del recipiente.

Se establece además un umbral mínimo de 12 mm (5% de la altura total), con el fin de evitar errores asociados a niveles bajos de agua, donde la lectura puede verse afectada por la presión atmosférica o el calentamiento del fondo metálico. Estas condiciones pueden inducir sobreestimaciones en la evaporación.

Por tanto, los registros fuera del rango 12–250 mm se consideran no válidos, al no representar condiciones operacionales confiables para la medición en el contexto del Salar de Atacama.



Se debe considerar que la altura máxima de relleno recomendada es de 200 mm, lo que equivale a aproximadamente 5 cm por debajo del borde del cilindro.

Adicionalmente, se define el rango entre 200 y 250 mm como un umbral de alerta, destinado a verificar el correcto funcionamiento del sistema de relleno automático. No se debe invalidar directamente una medición dentro de este rango, ya que eventos como la lluvia podrían justificar niveles superiores a los 200 mm. Sin embargo, si se observa una recurrencia de registros cercanos al límite superior sin causa meteorológica aparente, se recomienda revisar el sistema de alimentación de agua, incluyendo el flotador, la válvula y el sensor de presión, para descartar fallas o desconfiguraciones.

5.3.2. Presión atmosférica

En el contexto del Salar de Atacama y su entorno, los límites físicos de validación para la presión atmosférica se definen en función de la altitud de las estaciones meteorológicas. Para estaciones ubicadas entre los 2.000 y 2.600 m.s.n.m., se establece un rango de validación de 790 a 730 mbar, el cual refleja las condiciones atmosféricas típicas observadas en zonas de cuenca. En contraste, para estaciones emplazadas en sectores de alta montaña, entre los 4.000 y 4.400 m.s.n.m., se define un rango de 640 a 590 mbar, considerando la disminución esperada de presión con la altitud.

Estos rangos permiten filtrar registros que, aunque técnicamente posibles según la especificación del sensor, no son representativos de las condiciones reales del entorno y, por tanto, deben ser considerados no válidos.

En caso de instalarse estaciones en altitudes intermedias, se espera que los registros de presión se encuentren dentro del intervalo comprendido entre ambos tramos, siguiendo la tendencia altitudinal de disminución de presión atmosférica.

5.3.3. Temperatura del aire

En el contexto del Salar de Atacama y su entorno, la validación física de la temperatura del aire se fundamenta en los extremos térmicos registrados históricamente en la Región de Antofagasta. Según antecedentes climáticos, las temperaturas máximas han alcanzado valores cercanos a los 37 °C en sectores interiores, mientras que las mínimas han descendido hasta aproximadamente -12 °C en zonas altoandinas. Considerando estos valores como referencia y con el objetivo de absorber condiciones meteorológicas excepcionales sin comprometer la calidad de los datos, se establece un rango físico de validación entre -17 °C y 42 °C, aplicando un margen de ± 5 °C sobre los extremos observados. Este rango permite filtrar registros que, aunque técnicamente posibles según la especificación del sensor, no son representativos de las condiciones reales del entorno y, por tanto, deben ser considerados no válidos.

	<p style="text-align: center;">GHS-RAySH-M002</p> <p style="text-align: center;">Metodología de validación, cálculo de estadísticos y relleno para registros meteorológicos</p>	<p>Versión 00 Página 12 de 21</p>
--	---	---------------------------------------

5.3.4. Velocidad del viento

La validación física de la velocidad del viento se establece considerando los extremos observados en la Región de Antofagasta, tanto en zonas interiores como en sectores de alta montaña. En localidades como Calama, se han registrado ráfagas de hasta 32 nudos (aproximadamente 59 km/h o 16,4 m/s) durante eventos intensos. Por otro lado, en zonas altoandinas del norte de Chile, se han documentado velocidades cercanas a los 30 m/s. En particular, en la estación de Cerro Cosor, perteneciente a la red de monitoreo de SQM y ubicada sobre los 4.000 m.s.n.m., se ha registrado una velocidad máxima de 28,9 m/s, lo que evidencia la alta variabilidad del viento en estos entornos. Considerando estos antecedentes, se establece un rango físico de validación entre 0 y 35 m/s, aplicando un margen de seguridad de aproximadamente +20% sobre el valor máximo observado en altura, con el fin de absorber condiciones extremas sin comprometer la calidad de los datos. El límite inferior se fija en 0 m/s, ya que es físicamente posible que no se registre viento en determinados momentos del día, especialmente durante la noche o bajo condiciones de estabilidad atmosférica.

Para asegurar la representatividad de los datos, las estaciones meteorológicas deben ser instaladas siguiendo lineamientos técnicos definidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM o WMO en inglés), los cuales establecen criterios de exposición y emplazamiento para minimizar la influencia de obstáculos locales sobre las mediciones. En el caso de la velocidad del viento, se recomienda evitar la instalación de sensores en lomas, crestas de cerros o cercanías de quebradas, ya que estas condiciones pueden inducir fenómenos locales de aceleración o turbulencia que no son representativos del comportamiento regional del viento. Idealmente, los sensores deben ubicarse en terreno abierto, a una distancia mínima de 10 veces la altura de cualquier obstáculo circundante, y con una rugosidad superficial documentada. Estas consideraciones permiten reducir la incertidumbre asociada a la exposición del instrumento y asegurar que las mediciones reflejen condiciones atmosféricas reales y comparables entre estaciones (WMO, 2023).

5.3.5. Precipitación

En el contexto del Salar de Atacama, donde predominan condiciones áridas, la ocurrencia de precipitaciones intensas en lapsos breves es poco frecuente, pero no imposible. Para fortalecer la validación de registros en intervalos de 5 minutos, se establece como referencia que una intensidad superior a 5 mm en dicho periodo debe ser considerada un umbral de alerta.

En zonas del Altiplano afectadas por el invierno altiplánico, se han documentado eventos extremos de precipitación con acumulados diarios superiores a 30 mm, concentrados en lapsos de pocas horas. Según el estudio de Meseguer-Ruiz et al. (2020), estos eventos están asociados a la advección de humedad desde la Amazonía y a la configuración del anticiclón boliviano en niveles altos de la atmósfera. Por tanto, se considera técnicamente posible que ocurran intensidades de hasta 5 mm en 5 minutos durante tormentas convectivas localizadas, lo que debe ser considerado al validar registros de alta intensidad en intervalos cortos. Este



valor sirve como base para identificar registros potencialmente anómalos que podrían deberse a errores instrumentales o fallas en el sensor de precipitación.

No obstante, si se cuenta con evidencia de eventos meteorológicos extremos —como tormentas convectivas localizadas— y coherencia con registros de estaciones cercanas, estos valores pueden ser considerados válidos. En caso de superarse este umbral sin justificación meteorológica aparente, se recomienda revisar el estado del pluviómetro y validar la consistencia del dato con otras variables, como la humedad relativa, la nubosidad y la presión atmosférica.

En la Tabla 5 se presenta un resumen de los rangos físicos para las variables nivel de bandeja, presión atmosférica, temperatura del aire y velocidad del viento.

Tabla 5: Límites inferior y superior físico de las variables

Variable		Límite Inferior	Límite Superior
Nivel de bandeja de evaporación		12 mm	250 mm
Presión atmosférica	EM instaladas entre 2.000 y 2.600 m.s.n.m	730 mbar	790 mbar
	EM instaladas > 4.000 m.s.n.m	590 mbar	640 mbar
Temperatura del aire		-17 °C	42 °C
Velocidad del viento		0 m/s	35 m/s
Precipitación		0 mm	5 mm

5.4. Condiciones operaciones excepcionales

Este criterio considera eventos puntuales que, sin estar necesariamente asociados a fallas instrumentales, pueden afectar significativamente la calidad de los datos meteorológicos registrados.

A continuación se detallan los eventos considerados bajo este criterio.

5.4.1. Falla de sistema de relleno automático del pan de evaporación y/o configuración de sensor de presión.

La medición de la evaporación involucra componentes como la válvula programable, el flotador y el transductor de presión, todos ellos susceptibles a errores, desconfiguraciones o factores externos. Estos elementos forman parte del sistema de alimentación automática de agua a la bandeja de evaporación, cuyo correcto funcionamiento es esencial para asegurar la representatividad de los datos registrados.

La configuración o integridad de la válvula puede verse afectada, por ejemplo, si permanece abierta por más tiempo del programado. Asimismo, el flotador puede no detectar correctamente el nivel del agua, provocando un llenado innecesario. Este tipo de

comportamiento anómalo se refleja en los registros como un patrón de relleno constante, como se observa en la Figura 1.

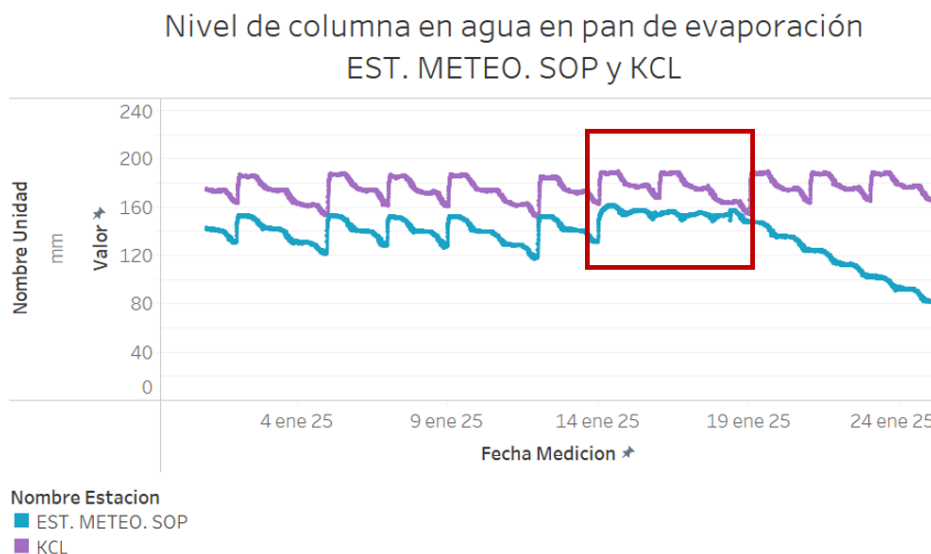


Figura 1: Relleno constante en estación meteorológica SOP en comparación con la variación del nivel de agua en la bandeja de evaporación de KCL.

Un caso representativo ocurrió en la estación SOP, donde el problema fue evaluado en terreno durante una visita de mantenimiento correctivo. Se detectó que la falla en la válvula fue ocasionada por la presencia de partículas de acero en la manguera que conecta el bin con la válvula, lo que dañó la membrana del sistema de cierre y provocó un llenado continuo de la bandeja de evaporación (Figura 2).

Estación meteorológica SOP

Válvula de relleno automático y residuos encontrados en maguera

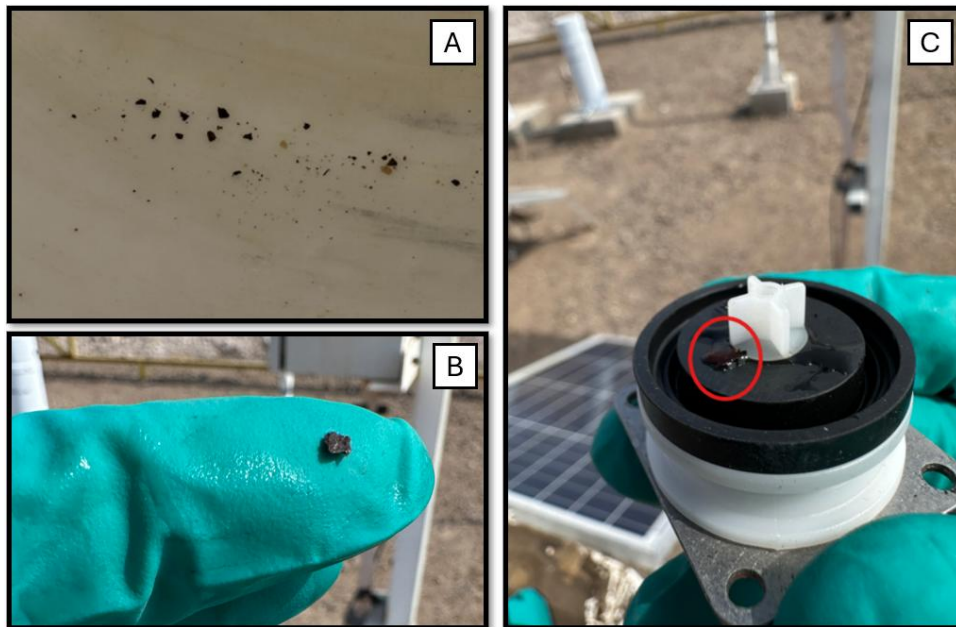


Figura 2: Partículas de acero encontradas en la maguera de conexión entre el bin y pan de evaporación en estación meteorológica

Por otro lado, también pueden presentarse fallas en el transductor de presión. Estas se manifiestan como tendencias atípicas en el descenso del nivel del agua, sin una causa meteorológica aparente. Un ejemplo de este tipo de falla se muestra en la Figura 3, correspondiente a la estación Chaxa. En estos casos, los registros deben ser invalidados y se recomienda gestionar una visita de mantenimiento para revisar la configuración del sensor y corregir posibles errores.

5.4.2. Condiciones climáticas

Como se mencionó anteriormente, las bandejas de evaporación son susceptibles a congelarse durante los meses de invierno debido a las bajas temperaturas, lo que puede generar mediciones atípicas.

En la Figura 4 se muestra el registro de evaporación en la estación meteorológica LZA9-1 (Interna), donde, si bien se observa una tendencia de descenso de la columna de agua consistente con lo medido en otras estaciones, también se registran aumentos anómalos en la altura del agua, que van desde milímetros hasta más de 10 cm. Estos valores deben ser invalidados, ya que no corresponden a procesos de evaporación reales.

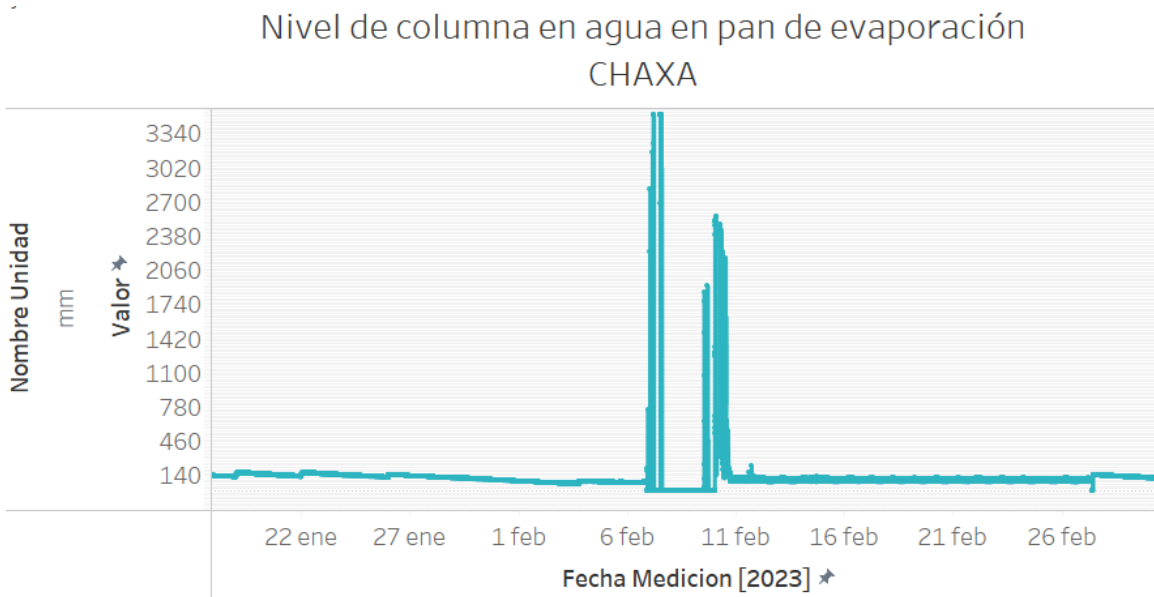


Figura 3: Registro anómalo medido por el sensor de nivel en el pan de evaporación de estación meteorológica Chaxa.

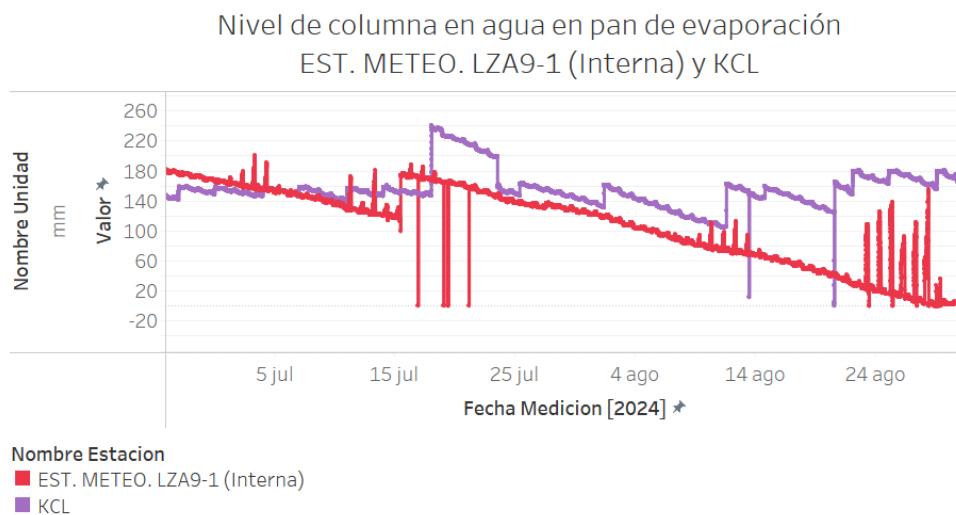


Figura 4: Medición de la columna de agua en las bandejas de evaporación de las estaciones LZA9-1 (Interna) y KCL.

Por el contrario, cuando se registran eventos de precipitación mediante el pluviómetro de la estación, se produce una recarga directa en la bandeja de evaporación, por lo que estos aumentos en la columna de agua son mediciones válidas. Sin embargo, si el incremento registrado en la bandeja de evaporación sobrestima significativamente la cantidad de precipitación medida por el pluviómetro, se recomienda gestionar una visita técnica para verificar el correcto funcionamiento de ambos sensores.

5.4.3. Sombras proyectadas sobre el piranómetro.

En algunas estaciones meteorológicas se ha identificado la presencia de sombras proyectadas por infraestructuras cercanas sobre el piranómetro, lo que genera interferencias sistemáticas en la medición de la radiación solar global. Estas interferencias se manifiestan como caídas abruptas y recurrentes en los registros diarios, generalmente en horarios similares, lo que permite diferenciarlas de fenómenos meteorológicos reales.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de como se observan las sombras medidas por el piranómetro, destacando la recurrencia horaria del fenómeno.

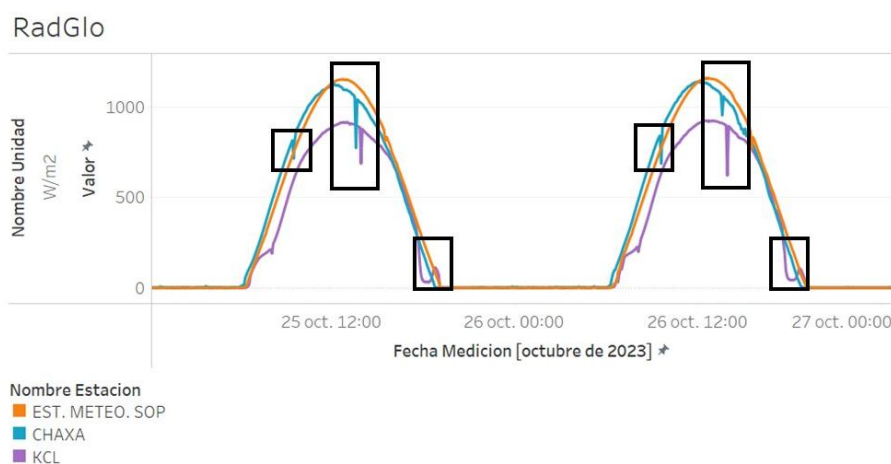


Figura 5: Registro bruto de radiación global desde el 25 al 26 de octubre en las estaciones Chaxa, SOP y KCL.

5.5. Valores atípicos (outliers)

Durante el registro de datos meteorológicos es posible que se presenten, de forma puntual y errática, valores atípicos que no responden a condiciones ambientales reales. Un caso común es la aparición de valores nulos o iguales a cero (0), en horarios donde se espera actividad o variación. Estos registros deben ser considerados como outliers instrumentales y descartados durante el proceso de validación.

Se debe destacar que, si las mediciones nulas se presentan de forma consecutiva y representan más del 5% del total de registros diarios esperados, se recomienda evaluar la funcionalidad del sensor correspondiente. En estos casos, el equipo de instrumentación deberá revisar el estado del equipo, su configuración y condiciones de operación para descartar fallas persistentes o desconexiones.

6. Cálculos de estadísticos

El cálculo de estadísticos diarios se realiza a partir de los datos brutos validados, considerando el periodo completo entre las 00:00 y las 23:59 horas de cada día. Este proceso permite obtener indicadores representativos del comportamiento diario de las variables



meteorológicas, los cuales son fundamentales para la reportabilidad ambiental, el análisis climático y la evaluación de condiciones operacionales.

Para asegurar la representatividad de los resultados, los estadísticos diarios se calculan únicamente si al menos el 95% de los registros del día han sido validados. En caso contrario, el valor diario se considera no representativo, se somete a procedimientos de relleno.

Las variables meteorológicas se procesan según su naturaleza y comportamiento esperado. Para la mayoría de las variables se calcula el promedio diario, y cuando corresponde, también se determinan los valores máximos y mínimos diarios. En el caso de la dirección del viento, se emplea la mediana, dada su escala circular. La precipitación se calcula como un acumulado diario, y la evaporación se estima como la diferencia entre los niveles máximos, entre las 00:00 y 21:00 hrs, y mínimos registrados entre las 21:00 y 24:00 hrs.

A continuación, se presenta un resumen de los estadísticos calculados por variable:

Tabla 6: Estadísticos diarios calculados por variable

Variable	Estadístico calculado	Unidad
Temperatura del aire	Promedio, Máximo, Mínimo	°C
Presión atmosférica	Promedio, Máximo, Mínimo	mbar
Humedad relativa	Promedio, Máximo, Mínimo	%
Velocidad del viento	Promedio, Máximo, Mínimo	m/s
Radiación solar global	Promedio, Máximo, Mínimo	W/m ² /día
Dirección del viento	Mediana	° sexagesimal
Precipitación	Acumulado	mm
Evaporación	Diferencia (máx - mín)	mm

7. Metodología de relleno

El proceso de relleno tiene como objetivo estimar valores diarios para aquellas variables meteorológicas que han sido invalidadas durante el proceso de validación. Este procedimiento se aplica exclusivamente a registros diarios que no alcanzan el umbral mínimo del 95% de datos brutos validados, condición necesaria para el cálculo de estadísticos representativos.



Es importante considerar que, en el caso de estaciones recientemente instaladas, la disponibilidad de datos históricos puede ser limitada. Esto puede dificultar el cálculo de correlaciones robustas o la identificación de estaciones con comportamiento representativo, lo que afecta la confiabilidad del proceso de relleno. En estos casos, se recomienda aplicar el procedimiento con especial cautela, documentando las decisiones adoptadas y evaluando rigurosamente la calidad de los datos interpolados.

El relleno se realiza de forma diferenciada según la variable, utilizando herramientas automatizadas desarrolladas en Python (Anexo 1). Estas herramientas permiten mantener la trazabilidad de los datos rellenos, indicando la fuente de información utilizada o, en su defecto, la ausencia de datos suficientes para estimar un valor confiable.

7.1. Relleno mediante correlación lineal

Para las variables meteorológicas distintas de la precipitación, el relleno se realiza mediante un script en Python que calcula la matriz de correlación lineal entre estaciones para cada variable. A partir de esta matriz, se selecciona la estación con mayor correlación (coeficiente de Pearson $\geq 0,5$), y se ajusta una regresión lineal simple para estimar el valor faltante.

7.2. Relleno de precipitación

Dado el carácter más localizado y discontinuo de la precipitación, su relleno se realiza de forma externa al script principal. Se calcula la correlación lineal entre estaciones de la red SQM y estaciones externas de la red INIA ubicadas en el entorno del Salar de Atacama. Las estaciones INIA consideradas incluyen Toconao, San Pedro de Atacama, Camar y Socaire.

Una vez identificadas las estaciones con mejor correlación, se ajusta una regresión lineal para estimar los valores faltantes. Estos se comparan con acumulados quincenales o mensuales de estaciones cercanas para asegurar que los órdenes de magnitud sean coherentes. Si los valores estimados no son consistentes, se invalidan y se utiliza directamente el valor de la estación más cercana como relleno.

Existen dos casos especiales en los que no es necesario ejecutar el código de interpolación para la precipitación:

- Invalidación por pruebas de pluviometría durante visitas de mantención: Si los registros fueron invalidados por simulaciones de lluvia realizadas por personal de SQM, y no se reportó precipitación real durante ese periodo, no corresponde realizar relleno.
- Ausencia de registros de lluvia en toda la red: Si ninguna de las estaciones de SQM ni las estaciones INIA registran precipitación para la fecha en cuestión, se asume que no hubo lluvia y no se requiere estimar un valor.

8. Conclusión

Este documento establece una metodología técnica integral para la validación, el relleno y el cálculo de estadísticos diarios de registros meteorológicos provenientes de la red de



estaciones de SQM en el Salar de Atacama. La aplicación sistemática de criterios de validación—incluyendo observaciones en terreno, rangos instrumentales y físicos, condiciones operacionales excepcionales, detección de outliers y consistencia entre variables—permite asegurar la calidad, trazabilidad y representatividad de los datos utilizados en procesos de análisis, modelación y reportabilidad ambiental.

El cálculo de estadísticos diarios se realiza únicamente cuando al menos el 95% de los registros brutos han sido validados, garantizando así la robustez de los promedios, máximos, mínimos, acumulados y medianas generadas. En los casos en que no se alcanza este umbral, se activa un procedimiento de relleno automatizado, basado en correlaciones lineales entre estaciones, implementado mediante herramientas desarrolladas en Python. Este proceso permite recuperar información faltante de manera trazable y controlada, con especial atención a la calidad de las correlaciones utilizadas.

En el caso de la precipitación, se incorpora información de estaciones externas (INIA) para mejorar la cobertura espacial del análisis. Además, se establecen criterios específicos que excluyen del proceso de relleno situaciones como pruebas de pluviometría durante visitas de mantención o la ausencia generalizada de registros de lluvia en toda la red.

La metodología aquí descrita es aplicable tanto a estaciones actualmente operativas como a futuras incorporaciones, y deberá ser actualizada en función de cambios en la infraestructura, incorporación de nuevas variables o modificaciones en los criterios regulatorios. Su implementación contribuye a fortalecer la confiabilidad de los datos meteorológicos y a respaldar con evidencia técnica los compromisos de reportabilidad ambiental de la organización.

9. Referencias

In-Situ. (2023). *Operator's Manual: Level TROLL 400, 500, 700, and 700H*. Retrieved from https://in-situ.com/pub/media/support/documents/Level-TROLL-400-500-700-700h_Manual.pdf

Meseguer-Ruiz, O., Ponce-Philimon, P., Baltazar, A., Guijarro, J., Serrano-Notivoli, R., Olcina Cantos, J., . . . Sarricolea, P. (2020). Synoptic attributions of extreme precipitation in the Atacama Desert (Chile). *Climate Dynamics*, 55, 3431-3444. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05455-4>

OTT HydroMet. (n.d.). *Operational Manual WS Series Smart Weather Sensors V1.0*. Retrieved from <https://www.lufft.com/download/operational-manual-lufft-wsxxx-weather-sensors/>

Texas Electronics Inc. (2024). *TR-525 Series Rainfall Sensors User's Manual*. Retrieved from https://texaselectronics.com/product/8-inch-tipping-bucket-rain-gauge/?attachment_id=4564&download_file=cxeec2pzf2iez



GHS-RAySH-M002

**Metodología de validación, cálculo de estadísticos y
relleno para registros meteorológicos**

Versión 00
Página 21 de 21

WMO, W. M. (2023). *Guide to Instruments and Methods of Observation: Volume I – Measurement of Meteorological Variables* (Vol. 8). Retrieved from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11269