

Revisión Revisión	Fecha Fecha	Descripción Descripción
0	2023-06-09	Acuerdo específico 7 CNO – Uniandes: Desarrollo de los protocolos asignados al CNO por las Resoluciones CREG 101-006 y 101-007 de 2023 ¹
1	2023-07-12 y 13	El SURER dio concepto favorable al protocolo en las reuniones 488 y 489.
2	2025-05-15	Ajuste de acuerdo con concepto CREG S2024011310 del 14/12/2024. Inclusión de procedimiento de cálculo del MCP cuando se actualicen las series medidas

¹ Autores:María Alejandra Vargas Torres. Camilo Andrés Sedano Quiroz, M.Sc. Nelson Andrés Salazar Peña, M.Sc. Oscar David Salamanca Gómez, M.Sc. Andrés Leonardo González Mancera, Ph.D. Universidad de los Andes

1. Objetivo

El presente protocolo define la metodología para la reconstrucción de las series de datos de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica para plantas eólicas conforme con lo establecido en Numeral 4 del Artículo 3 de la Resolución CREG 101 006 de 2023.

2. Ámbito de aplicación

La metodología definida en el presente protocolo aplica a plantas de generación eólica, que van a participar en algún mecanismo de asignación de obligaciones del cargo por confiabilidad de que trata la Resolución CREG 071 de 2006 (o todas aquellas que la modifiquen, adicionen o sustituyan), a plantas eólicas que apliquen procedimientos relacionados con asignación de obligaciones del cargo por confiabilidad, y a plantas eólicas que tengan Obligaciones de Energía Firme (OEF) previamente asignadas a la expedición de la citada Resolución.

3. Metodología de reconstrucción de la serie de datos de velocidad del viento

En el presente protocolo se describe la metodología MCP con que se realiza la reconstrucción histórica de las series de datos de velocidad del viento (V), dirección del viento (D), temperatura ambiente (TA) y presión atmosférica (P).

Para la construcción de las series de datos de diez años o más de velocidad y dirección del viento, y temperatura ambiente, podrá utilizarse información horaria de fuentes secundarias definidas en el listado del **Acuerdo CNO 1720, por el cual se aprueba la lista de entidades que pueden utilizarse como fuentes de información secundaria de plantas eólicas, o aquel que lo modifique o sustituya**

Para la reconstrucción de las series de datos de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica, dichas series de datos deben haber sido adquiridas conforme con lo dispuesto en el Acuerdo CNO 1715 de 2023 o aquel que lo modifique o sustituya, y el Acuerdo CNO 1716 de 2023 o aquel que lo modifique o sustituya.

En la Figura 1 se presenta el diagrama de flujo de la metodología MCP que se debe aplicar.

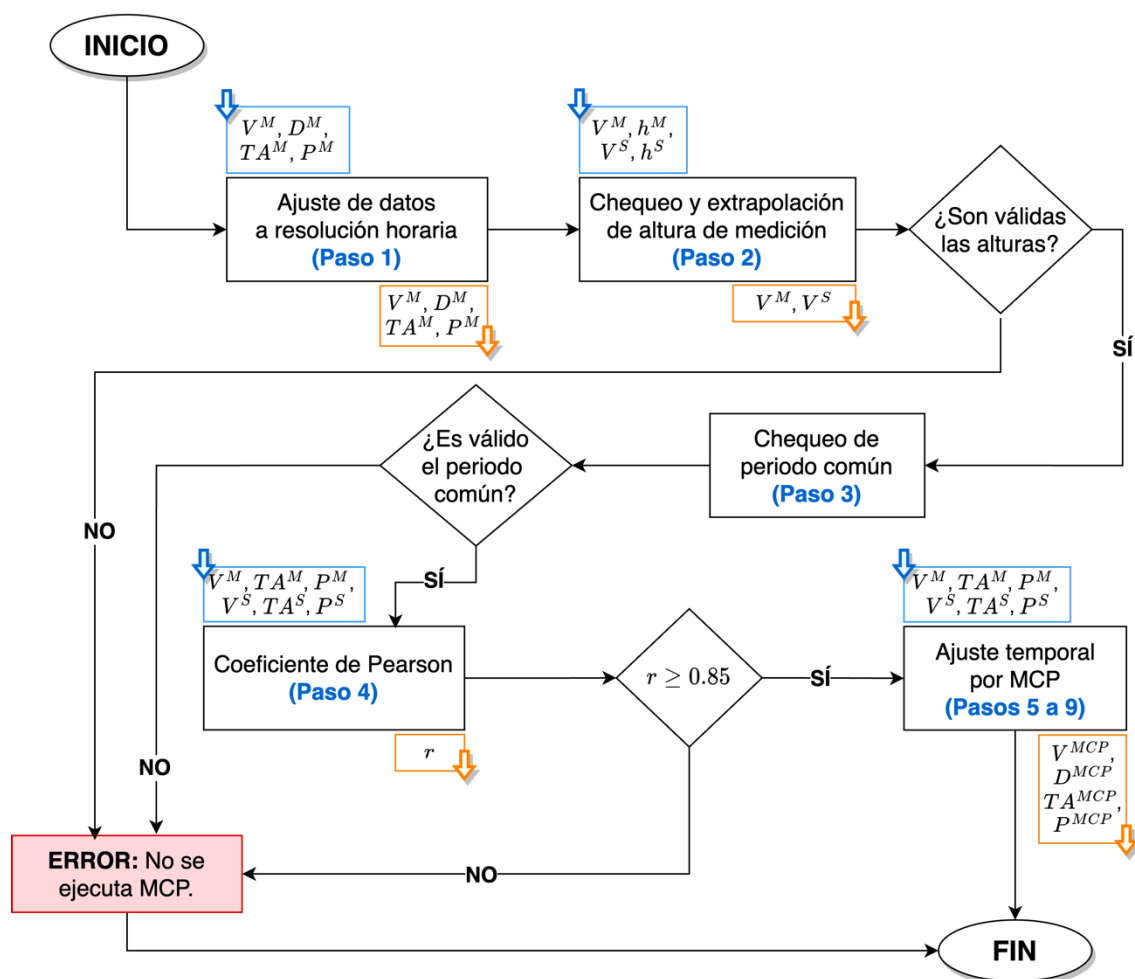


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología MCP. Los superíndices M y S corresponden a las series de datos de medición en sitio y fuente secundaria, respectivamente.

3.1. Corroboración de aplicabilidad

3.1.1. Agregación de datos a resolución horaria

Las series de datos de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica medidas en sitio en resolución diezminutal deben agregarse a resolución horaria.

El ajuste de las series de datos de velocidad del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica se realiza mediante el promedio simple de los datos presentes en cada rango horario. Por otra parte, el ajuste de la serie de datos de la dirección del

viento debe realizarse de forma vectorial a partir de los datos presentes en cada rango horario.

El resultado son series de datos de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica cuyas estampas de tiempo son en resolución horaria.

3.1.2. Chequeo y extrapolación de altura de medición

Se chequea la altura de la serie de datos de la fuente secundaria (V^S) con respecto a las alturas de medición de la serie de datos de medición en sitio (V^M).

Si la altura de medición de la serie de datos de la fuente secundaria (h^S) es igual a una de las alturas de medición de la serie de datos de medición en sitio (h^M), se continúa con la Sección 3.1.3. Chequeo de Periodo Común.

De lo contrario, se debe emplear el siguiente método de extrapolación por altura:

$$V_x = V_y \cdot \left(\frac{h_x}{h_y} \right)^\alpha \quad (1)$$

Se debe tener presente que:

- Las alturas de medición en sitio (h^M) deben estar organizadas de forma ascendente.
- Si la altura de la serie de datos de la fuente secundaria es mayor a la máxima altura de las alturas de medición en sitio, es decir $h^S > \max(h^M)$, entonces $h_x = h^S$, $h_y = \max(h^M)$ y $V_y = V^M$ correspondiente a la altura h_y . En este caso, V_x es la serie de datos de velocidad del viento medida en sitio extrapolada a la altura de la fuente secundaria.
- Si la altura de la serie de datos de la fuente secundaria se encuentra entre el mínimo y máximo de las alturas de medición en sitio, es decir $\min(h^M) \leq h^S \leq \max(h^M)$, entonces h_x es la altura de medición en sitio más cercana a la altura de la serie de datos de la fuente secundaria, $h_y = h^S$ y $V_y = V^S$. En este caso, V_x es la serie de datos de velocidad del viento de la fuente secundaria extrapolada a la altura de la medición en sitio correspondiente a h_x .
- Si la altura de la fuente secundaria es menor a la mínima altura de medición en sitio, es decir $h^S < \min(h^M)$, entonces $h_x = \min(h^M)$, $h_y = h^S$ y $V_y = V^S$. En este caso, V_x es la serie de datos de velocidad del viento de la fuente secundaria extrapolada a la mínima altura de medición en sitio.

El parámetro α se conoce como cortante del viento y su cálculo depende del número de alturas de medición de la serie de datos de medición en sitio.

- **Una altura de medición:** Se utiliza la ecuación conocida como Justus-Mikhail (Ecuación 2). En este caso solo existe una serie de datos de medición en sitio de velocidad y dirección del viento a una única altura de medición.

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln(V^M)}{1 - 0.088 \ln(h^M)} \quad (2)$$

- **Dos alturas de medición:** Se utiliza la ecuación conocida como Hellman (Ecuación 3). En este caso $h_2^M > h_1^M$, luego, V_2^M es la serie de datos de medición en sitio de velocidad del viento a una altura de medición mayor que V_1^M .

$$\alpha = \frac{\ln(V_2^M/V_1^M)}{\ln(h_2^M/h_1^M)} \quad (3)$$

- **Tres o más alturas de medición:** Se utiliza la ecuación conocida como Durisic-Mikulovic (Ecuación 4). En este caso $h_i^M > \dots > h_2^M > h_1^M$, luego, V_i^M es la serie de datos de medición en sitio de velocidad del viento a una altura de medición mayor que V_2^M y, a su vez, V_2^M es la serie de datos de medición en sitio de velocidad del viento a una altura de medición mayor que V_1^M .

$$\alpha = \text{pendiente}([\ln(V_1^M), \dots, \ln(V_i^M)], [\ln(h_1^M), \dots, \ln(h_i^M)]) \quad (4)$$

El cortante del viento (α) instantáneo corresponde a la pendiente del ajuste lineal por mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés) entre los datos instantáneos de la velocidad del viento en cada altura medida, y la respectiva altura de medición. Este procedimiento se repite para cada estampa de tiempo en la serie de datos.

Nota: El cálculo del cortante del viento no requiere el uso de todas las alturas de medición. Por ejemplo, si se tienen tres alturas de medición, además de la ecuación de Durisic-Mikulovic (Ecuación 4), también es posible utilizar las ecuaciones de Justus-Mikhail (Ecuación 2) o Hellman (Ecuación 3).

Aunque el resultado del cálculo del cortante del viento es una serie de tiempo en resolución horaria, el cortante del viento debe reportarse como un promedio horario

para cada mes y según la dirección del viento (ver Tabla 1). Luego, el valor de cortante del viento a utilizar en la Ecuación 1 es aquel correspondiente al mes, hora y dirección del viento dado por V^M .

Tabla 1. Promedio horario para cada mes del cortante del viento (α) discretizado por intervalos de dirección del viento (grados relativos al norte geográfico).

Mes	Hora	Cortante del viento (α)					
		[0 – 60)	[60 – 120)	[120 – 180)	[180 – 240)	[240 – 300)	[300 – 360]
1	0						
1	1						
1	2						
1	:						
1	23						
2	0						
2	1						
2	2						
2	:						
2	23						
:	:						
12	0						
12	1						
12	2						
12	:						
12	23						

El resultado de este procedimiento es dos series de datos (de medición en sitio y fuente secundaria) a una misma altura.

Nota: En lo restante del protocolo se hará mención a series de datos de medición en sitio y fuente secundaria, más debe entenderse que únicamente una serie de datos ya fue extrapolada de manera que ambas series de datos están a una misma altura.

3.1.3. Chequeo de periodo común

Para la metodología de reconstrucción histórica de la serie de datos de velocidad del viento se requiere:

1. Información de referencia de largo plazo (≥ 10 años); típicamente corresponde a la serie de datos de la fuente secundaria (S). **Dicha fuente secundaria debe**

ser la suministrada por la entidad reconocida y no puede ser modificada ni ajustada previo a la aplicación de este protocolo.

2. Información medida adecuadamente en la ubicación objetivo por al menos 1 año (12 meses) continuo; la cual corresponde a la serie de datos de medición en sitio (M).
3. Dicha serie de datos no debe estar afectada por obstáculos cercanos capaces de distorsionar su relación con la serie de datos secundaria.

A partir de las series de datos de medición en sitio (M) y fuente secundaria (S), se debe verificar que:

1. Contar con la información de la serie de datos de la fuente secundaria (S) para el mismo período de registro de la serie de datos de medición en sitio (M), (período común).
2. El periodo común de ambas series es mínimo de 1 año (12 meses) continuo.

Si alguno de los dos ítems previos no se cumple, no se continúa con la metodología MCP.

3.1.4. Coeficiente de Pearson

El nivel de correlación es cuantificado con el coeficiente de correlación de Pearson (r) a partir de la serie de datos de medición en sitio y fuente secundaria durante el periodo común (mínimo un año en resolución horaria) y las dos series de datos a una misma altura.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2(y_i - \bar{y})^2}} \geq 0.85 \quad (6)$$

Donde el subíndice i corresponde a cada valor en la serie de datos, x corresponde a la información de la serie de datos de medición en sitio y $\bar{x}$ a su promedio, y y corresponde a la información de la serie de datos de la fuente secundaria y $\bar{y}$ a su promedio.

El límite inferior aceptado del parámetro r es 0.85 (i.e., $r \geq 0.85$), de acuerdo con lo establecido en el Numeral 4 del Artículo 3 de la Resolución CREG 101 006 de 2023.

3.2. Procedimiento de reconstrucción histórica con metodología MCP

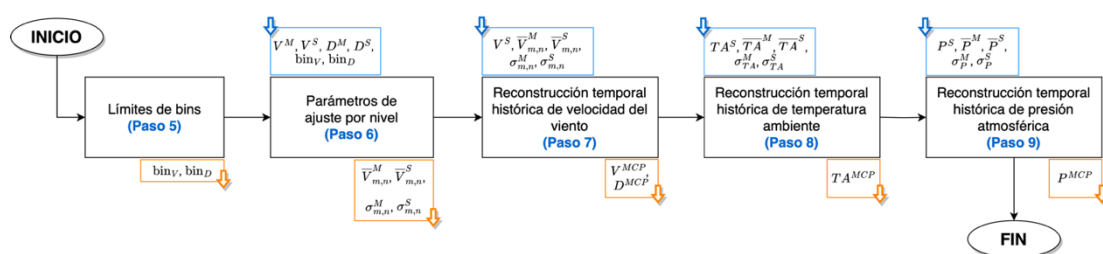


Figura 2. Diagrama de flujo del ajuste temporal por metodología MCP.

Para el proceso de reconstrucción se incorpora la dirección del viento en el proceso de reconstrucción mediante una clasificación de dos niveles (velocidad y dirección del viento) para la creación de dos matrices, típicamente, de igual tamaño. Este procedimiento de clasificación se realiza para el periodo común entre las series de datos. Se tendrán entonces N número de ajustes como combinaciones de niveles (velocidad-dirección) se tengan. Finalmente, la aplicación del modelo de reconstrucción temporal ajusta un modelo lineal para la velocidad del viento junto con un factor de corrección por diferencias en la variable de dirección del viento.

3.2.1. Límites de bins

Se define una lista por variable (i.e., velocidad del viento y dirección del viento) para las series de datos de medición en sitio y fuente secundaria. Cada una de las listas representa uno de los niveles de clasificación de las matrices homogéneas en tamaño.

- **bin_v**: Lista que contiene los límites de velocidad en intervalos de 3 m/s hasta $\max(V^M, V^S)$ en los que se clasificarán las series de datos. La expresión $\max(V^M, V^S)$ indica la velocidad del viento máxima entre las series de datos de medición en sitio y fuente secundaria. Los límites deben ser de la forma $[a, b)$, donde a está contenido dentro del intervalo mientras b no está incluido. El límite máximo debe ser de la forma $[a, b]$, con ambos valores a y b contenidos.
- **bin_D**: Vector que contiene los límites de dirección en los que se clasificarán las series de datos. La lista es: $\text{bin}_D = [0, 60, 120, 180, 240, 300, 360]$.

3.2.2. Parámetros MCP de ajuste por nivel

Este paso se aplica para las dos series de datos (i.e., medición en sitio y fuente secundaria), de forma conjunta por lo que se obtienen matrices de igual tamaño para cada una de las fuentes de información ($m \times n$, siendo m los bins de velocidad del viento y n los bins de dirección del viento). De esta forma, es posible calcular la velocidad del viento promedio y la desviación estándar de cada una de las fuentes de información. Esto se realiza para cada uno de los niveles de clasificación conjuntos.

$$\bar{V}_{m,n} = \text{promedio}(V_{m,n}) \quad (6)$$

$$\sigma_{m,n} = \sigma(V_{m,n}) \quad (7)$$

La desviación estándar corresponde a la muestral (Ecuación 8).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

Se deben obtener cuatro variables:

- $\bar{V}_{m,n}^M$: Variable que almacena los valores de promedio de la serie de datos de medición en sitio para el ajuste del modelo lineal.
- $\sigma_{m,n}^M$: Variable que almacena los valores de desviación estándar muestral de la serie de datos de medición en sitio para el ajuste del modelo lineal.
- $\bar{V}_{m,n}^S$: Variable que almacena los valores de promedio de la serie de datos de la fuente secundaria para el ajuste del modelo lineal.
- $\sigma_{m,n}^S$: Variable que almacena los parámetros de desviación estándar muestral de la serie de datos de la fuente secundaria en sitio para el ajuste del modelo lineal.

Tabla 2. Se obtienen dos matrices: de promedio y de desviación estándar, tanto para la serie de datos de medición en sitio como para la serie de datos de la fuente secundaria. Los valores de bin_V deben corresponder con lo definido en la Sección 3.2.1.

$\text{bin}_V / \text{bin}_D$	[0 – 60)	[60 – 120)	[120 – 180)	[180 – 240)	[240 – 300)	[300 – 360]
[0 – 3)						
[3 – 6)						
[6 – 9)						
[9 – 12)						
[12 – $\max(V^M, V^S)$]						

3.2.3. Reconstrucción temporal histórica de velocidad del viento y dirección del viento

Los parámetros MCP de ajuste por nivel son utilizados junto a la serie de datos de la fuente secundaria para realizar la reconstrucción temporal histórica de mínimo 10 años de la serie de datos de velocidad del viento (V^{MCP}) con la Ecuación 9. Este

procedimiento es instantáneo, es decir, debe repetirse para cada estampa temporal i de la serie de datos de la fuente secundaria (V_i^S).

$$V_i^{MCP} = \left(\bar{V}_{m,n}^M - \frac{\sigma_{m,n}^M}{\sigma_{m,n}^S} \cdot \bar{V}_{m,n}^S \right) + \left(\frac{\sigma_{m,n}^M}{\sigma_{m,n}^S} \cdot V_i^S \right) \quad (9)$$

Por otra parte, si se tiene una serie de datos de medición en sitio de dirección del viento inferior a 10 años, la reconstrucción temporal histórica (D^{MCP}) se realiza al completar la serie de datos de medición en sitio con los datos de dirección del viento de la fuente secundaria hasta cumplir con el requisito mínimo de 10 años. La fuente secundaria debe ser la misma utilizada para la reconstrucción temporal histórica de velocidad del viento y temperatura ambiente. Luego, dicha fuente secundaria debe cumplir con el coeficiente de Pearson definido en la Sección 3.1.4.

En caso de no tener una serie de datos de medición en sitio de dirección del viento, dicha información de la dirección del viento en la reconstrucción temporal histórica (D^{MCP}) corresponde a la serie de datos de dirección del viento de la fuente secundaria manteniendo coincidencia en la estampa de tiempo. La fuente secundaria debe ser la misma utilizada para la reconstrucción temporal histórica de velocidad del viento. Luego, dicha fuente secundaria debe cumplir con el coeficiente de Pearson definido en la Sección 3.1.4.

3.2.4. Reconstrucción temporal histórica de temperatura ambiente

La reconstrucción temporal histórica de mínimo 10 años de la serie de datos de temperatura ambiente (TA^{MCP}) se realiza mediante la Ecuación 10. Este procedimiento es instantáneo, es decir, debe repetirse para cada estampa de tiempo i de la serie de datos de la fuente secundaria.

$$TA_i^{MCP} = \left(\bar{TA}^M - \frac{\sigma_{TA}^M}{\sigma_{TA}^S} \cdot \bar{TA}^S \right) + \left(\frac{\sigma_{TA}^M}{\sigma_{TA}^S} \cdot TA_i^S \right) \quad (10)$$

Donde:

- $\bar{TA}^M$: Variable que almacena el promedio de la temperatura ambiente de la serie de datos de medición en sitio.
- σ_{TA}^M : Variable que almacena la desviación estándar muestral de la temperatura ambiente de la serie de datos de medición en sitio.
- $\bar{TA}^S$: Variable que almacena el promedio de la temperatura ambiente de la serie de datos de la fuente secundaria únicamente para el periodo común.

- σ_{TA}^S : Variable que almacena la desviación estándar muestral de la temperatura ambiente de la serie de datos de la fuente secundaria únicamente para el periodo común.
- TA_i^S : Temperatura ambiente de la serie de datos de la fuente secundaria para la estampa temporal i .

3.2.5. Reconstrucción temporal histórica de presión atmosférica

La reconstrucción temporal histórica de mínimo 10 años de la serie de datos de presión atmosférica (P^{MCP}) se realiza mediante la Ecuación 11. Este procedimiento es instantáneo, es decir, debe repetirse para cada estampa de tiempo i de la serie de datos de la fuente secundaria.

$$P_i^{MCP} = \left(\bar{P}^M - \frac{\sigma_P^M}{\sigma_P^S} \cdot \bar{P}^S \right) + \left(\frac{\sigma_P^M}{\sigma_P^S} \cdot P_i^S \right) \quad (11)$$

Donde:

- $\bar{P}^M$: Variable que almacena el promedio de la presión atmosférica de la serie de datos de medición en sitio.
- σ_P^M : Variable que almacena la desviación estándar muestral de la presión atmosférica de la serie de datos de medición en sitio.
- $\bar{P}^S$: Variable que almacena el promedio de la presión atmosférica de la serie de datos de la fuente secundaria únicamente para el periodo común.
- σ_P^S : Variable que almacena la desviación estándar muestral de la presión atmosférica de la serie de datos de la fuente secundaria únicamente para el periodo común.
- P_i^S : Presión atmosférica de la serie de datos de la fuente secundaria para la estampa temporal i .

3.3. Aplicación del procedimiento de reconstrucción temporal histórica de los datos

La reconstrucción temporal histórica de las series de datos de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica, deberá aplicarse para el cálculo de las series de ENFICC por primera vez y para su actualización con datos medidos en el sitio del proyecto, de acuerdo con lo definido en los artículos 3 y 4 de la Resolución CREG 101 006 de 2023, y las aclaraciones dadas en el concepto CREG S2024011310 del 14 de diciembre de 2024.

3.3.1. Reconstrucción de las series meteorológicas históricas por primera vez

Para la reconstrucción de las series históricas de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica para el cálculo de la ENFICC por primera vez, deberá aplicarse el procedimiento definido en el numeral 3.2 del presente anexo, verificando los criterios de aplicabilidad definidos en el numeral 3.1 del presente anexo. Se debe garantizar que de los datos medidos en sitio se cuente por lo menos con 1 año (12 meses) continuo. En caso de contar con información adicional al año de medición continua esta también podrá ser utilizada.

3.3.2. Actualización de las series meteorológicas históricas con datos medidos en el sitio de la planta

Toda vez que se realicen actualizaciones de las series históricas de velocidad del viento, dirección del viento, temperatura ambiente y presión atmosférica con información medida en el sitio de la planta, se deberá aplicar el procedimiento de reconstrucción de las series descrito en el numeral 3.2 del presente anexo, verificando los criterios de aplicabilidad definidos en el numeral 3.1

En este caso, se deberá usar la información de ambas series para el período de registro en el que se tengan datos medidos en el sitio de la planta, hasta el 30 de noviembre del año anterior al año en que se está haciendo la actualización.