

Medidor móvil de precipitación (MMP)

Juan Ignacio PÉREZ SOLADANA
AEMET

Resumen: La medida de la precipitación con pluviómetros de captura está fuertemente influenciada por el viento en las proximidades de la boca del pluviómetro. El efecto del viento siempre es que la precipitación medida es menor que la real. Este error puede ser importante en aplicaciones como el cálculo de escorrentías en las cuencas hidrográficas, dimensionamiento de alcantarillado, modelos numéricos, etc. En este texto se describe un sistema de medida de la precipitación que tiene como objeto solventar este problema y se exponen los resultados obtenidos.

Palabras clave: precipitación, pluviómetro, viento.

1. INTRODUCCIÓN

En ocasiones ocurre que después de pasar unas horas en un episodio de lluvia intensa y viento, al ir al pluviómetro para ver los datos de precipitación, da la sensación de que la cantidad registrada es muy inferior a la que se había imaginado.

En muchos casos la intuición no falla y la cantidad de precipitación caída es mayor que la medida por el equipo. Entonces, ¿ha fallado el pluviómetro? Pues tampoco, el equipo de medida

(en la mayoría de los casos un pluviómetro tipo Hellman manual o automático) ha realizado su trabajo de acuerdo con sus parámetros de diseño pero existen diversas causas que, como se verá más adelante, que explican que estos equipos no sean capaces de medir toda la precipitación caída.

Si se sale a la calle con paraguas un día de lluvia, lo normal no es poner el paraguas en vertical. Inconscientemente se va inclinando dependiendo de la velocidad del viento y de la velocidad de desplazamiento. Con este simple gesto se espera maximizar la superficie de protección del paraguas y con ello minimizar el efecto de la lluvia sobre el cuerpo.

Algo parecido ocurre cuando se mide la lluvia con el pluviómetro de

captura tipo Hellman, si se quiere recoger la mayor cantidad de precipitación se tiene que girar la boca del pluviómetro.

En este documento se van a presentar los resultados obtenidos con un sistema de medida de la precipitación que ajusta la inclinación del pluviómetro para maximizar la medida de la precipitación.



Figura 1. Lluvia con viento.

2. MEDIDA DE LA PRECIPITACIÓN

Sin entrar a fondo en los equipos de medida de la lluvia, se van a introducir algunas formas de medida y los equipos asociados. Los equipos de medida de la precipitación se pueden dividir en dos grandes grupos: los que capturan la lluvia y los que la estiman.

2.1. Pluviómetros que capturan la lluvia

Este tipo de pluviómetro es el instrumento más utilizado para medir la precipitación. Generalmente se utiliza un recipiente abierto de lados verticales, en forma de cilindro recto y con un embudo. La forma de evaluar la cantidad de precipitación dará lugar a diferentes tipos de pluviómetros (ordinario, pesada, flotador, balancín, etc.).

Algunas de las características generales son:

- pueden ser calibrados en el laboratorio,
- presentan problemas en la medida como consecuencia del efecto del viento,
- presentan problemas de evaporación y humectación, y
- por lo general son fáciles de usar.

El tamaño de la boca del colector no es determinante cuando se trata de precipitación líquida, pero se requiere por lo menos un área de 200 cm² que es el valor más usado.

Los principales tipos de pluviómetro, atendiendo a la forma de evaluar la cantidad de precipitación, son:

- Pluviómetro ordinario. La precipitación recogida en el pluviómetro se puede guardar en un depósito y medirla de forma manual en los periodos marcados para la observación con ayuda de una probeta graduada.
- Pluviómetro de pesada. En estos instrumentos se registra en forma continua el peso del recipiente con la precipitación que se acumula en él.
- Pluviógrafo de flotador. El agua recogida pasa a un depósito con un flotador y el movimiento ascendente del flotador al llenarse es transmitido a una plumilla que va dejando el registro en una banda.
- Pluviómetro de balancín. El agua de lluvia es conducida desde un colector balancín con dos cangilones calibrados. La lluvia cae en un cangilón que se va llenando y una vez alcanzado un volumen deseado, el peso del agua hace que bascule y enfrente el siguiente cangilón al orificio de salida de agua. La lluvia caída estará relacionada con el número de oscilaciones del balancín y la relación dependerá de la capacidad del cangilón. Estas oscilaciones son detectadas por un sensor y enviadas a un microprocesador.

2.2. Pluviómetros sin captura de lluvia

La mayoría de estos equipos miden las partículas de la precipitación con diferentes tecnologías: detectores ópticos, impacto mecánico producido sobre una superficie en la caída, eco devuelto ante una radiación incidente.

Entre las características generales de estos equipos destacan:

- son difíciles de calibrar,
- no se ven afectados por problemas de evaporación, humectación y son menos sensibles al viento, y
- pueden dar información sobre la distribución del tamaño de las gotas de lluvia.

Los principales tipos de pluviómetro de este tipo son:

- Disdrómetro óptico. En este caso se utiliza la dispersión de un haz de luz para detectar la caída de las gotas de lluvia. Un diodo láser y un sistema óptico producen un conjunto de haces de luz infrarroja paralelos que generan un área de detección de gotas. Cuando la precipitación atraviesa este haz, la señal en el receptor disminuye. La amplitud de esta reducción en la señal recibida se relaciona con el tamaño de las partículas y la duración de esta reducción con la velocidad de caída.
- Disdrómetro piezoeléctrico. La detección de las gotas de lluvia se realiza mediante un sensor piezoeléctrico. Las gotas al chocar con la cubierta generan unas ondas elásticas que son detectadas por el sensor piezoeléctrico. La señal resultante de los impactos será proporcional al volumen de las gotas y se podrá convertir en precipitación acumulada.
- Pluviómetro radar. Se utiliza la reflexión de un haz de microondas por los hidrometeoros en caída libre para su detección. Cerca del suelo los hidrometeoros han adquirido un equilibrio aerodinámico y caen con velocidad constante que depende de su tamaño. De la señal reflejada se puede obtener la velocidad de caída a partir del desplazamiento *doppler* de la señal y la reflectividad de los hidrometeoros y su concentración dependiendo de su amplitud.
- Observaciones por satélite. Se han desarrollado técnicas para calcular las precipitaciones horarias, diarias y mensuales a partir de imágenes captadas por satélites geoestacionarios o de órbita polar.

En adelante dentro de este artículo solo se van a considerar diferentes aspectos de pluviómetros de captura de precipitación.

3. ERRORES EN LA MEDIDA DE LOS PLUVIÓMETROS

La cantidad de precipitación medida por los pluviómetros utilizados normalmente es inferior a la real. En los pluviómetros de captura hay algunas fuentes de error como son:

- el error debido a la pérdida por humectación de las paredes interiores del colector,
- el error debido a la pérdida de humectación en el depósito donde se mide la precipitación,
- el error debido a la evaporación en el depósito,
- el error debido a las salpicaduras hacia dentro y hacia fuera,
- los errores aleatorios de observación y del instrumento, y
- los errores debidos al viento en la boca del pluviómetro.

De todos estos errores destaca por su importancia la incidencia del viento en las proximidades del pluviómetro.

4. ERRORES DEBIDOS AL EFECTO DEL VIENTO EN PLUVIÓMETROS DE CAPTURA

El efecto del viento en la medida de la precipitación tiene dos componentes: la modificación del flujo de aire alrededor del pluviómetro y la disminución del área de captación.

Se podría evaluar la precipitación real P a partir de la precipitación capturada por el pluviómetro (P_c) si se pudieran calcular unos coeficientes de corrección (deformación del campo de viento k_d , disminución del área k_r),

$$P = k_d \times k_r \times P_c \quad (1)$$

4.1. Modificación del flujo de aire alrededor del pluviómetro

El pluviómetro es un obstáculo en el movimiento del aire que provoca turbulencias sobre la zona de captación de la precipitación. Hay diferentes diseños de pluviómetros cuya construcción afecta en mayor o menor medida a la deformación del campo de viento en la boca del pluviómetro.

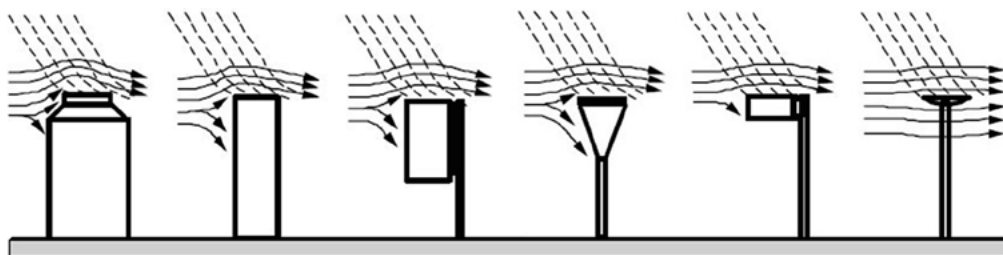


Figura 2. Diseños de pluviómetros de captura.

Para cuantificar el problema existen varios enfoques:

1. Intercomparaciones en campo: Los errores se evalúan por comparación con pluviómetros de referencia. En WMO (1998) se recogen los resultados de una campaña internacional de comparación de pluviómetros. Se ofrecen valoraciones para el parámetro de corrección k_d en función de la velocidad del viento durante la precipitación al nivel del borde del pluviómetro (v_f) y el parámetro de estructura de la precipitación N (dependiente de la proporción de las precipitaciones de baja intensidad $i_p < 0,03 \text{ mm/min}$, de la intensidad de la lluvia, de la temperatura y humedad del aire y del tipo de precipitación). Por ejemplo para el pluviómetro Hellman (figura 3) se ve que la corrección es mayor a mayor velocidad del viento.

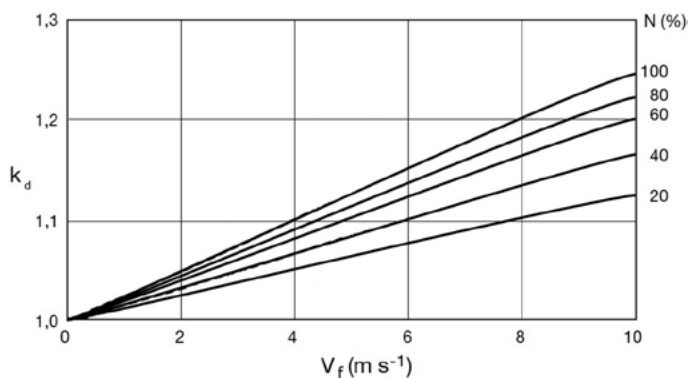


Figura 3. Corrección de la precipitación para pluviómetros Hellman (k_d).

2. Simulación numérica: Otro enfoque que se le ha dado al estudio de este problema es el uso de modelos numéricos del tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics*). En NESPOR y SEVRUK (1999) se utiliza el programa PHOENICS para el cálculo de la modificación del campo de viento alrededor de un pluviómetro. Si se considera solo un flujo de viento horizontal de 3 m/s y un pluviómetro tipo Mark II, se obtienen los resultados mostrados en la figura 4.

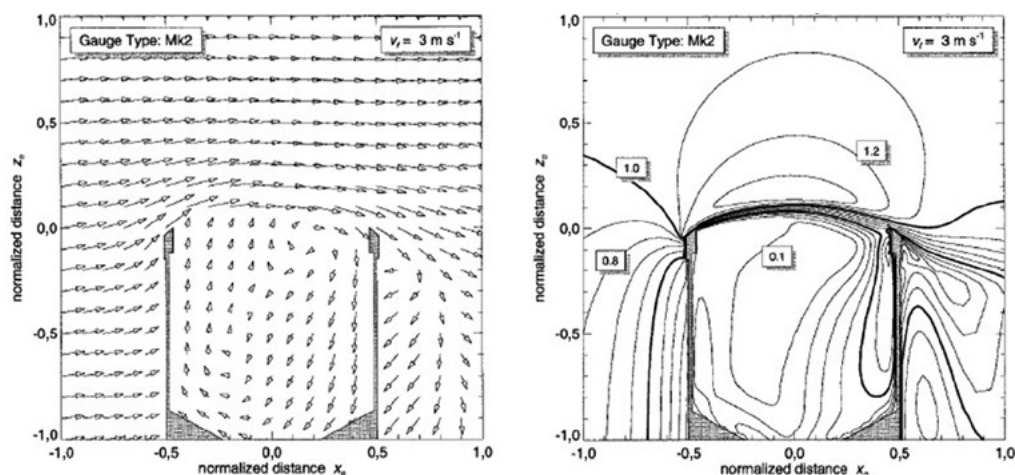


Figura 4. Modificación del campo de viento alrededor de un pluviómetro.

Si se introduce en la simulación una precipitación formada por gotas de igual diámetro cayendo a la misma velocidad se obtienen trayectorias para las gotas de lluvia como las de la figura 5, en la que se muestra como el área de captación está modificada por el viento.

4.2. Disminución del área de captación

Existe una disminución del área efectiva de captación de la precipitación cuando el flujo de lluvia no es perpendicular a la superficie que forma el borde del pluviómetro. Cuando hay viento la precipitación no cae de forma vertical, sino que presenta una inclinación respecto a la vertical del eje del pluviómetro que hace que la sección eficaz de la boca del pluviómetro sea inferior a los valores normalizados (200 cm^2 en el caso de los pluviómetros Hellman) y se recoge la precipitación sobre una superficie menor de la establecida y, por lo tanto, se captura menos precipitación.

Debido a la inclinación del flujo de lluvia, el bloque de gotas que entran en el pluviómetro forma un cilindro elíptico.

La relación entre el área real de captación y el área normalizada será:

$$\text{Área de captación} = \pi \times R \times R \times \sin(\text{elevación}) = \text{Área normalizada} \times \sin(\text{elevación}), \quad (2)$$

siendo la elevación el ángulo que forma la dirección de caída de las gotas de lluvia y la horizontal.

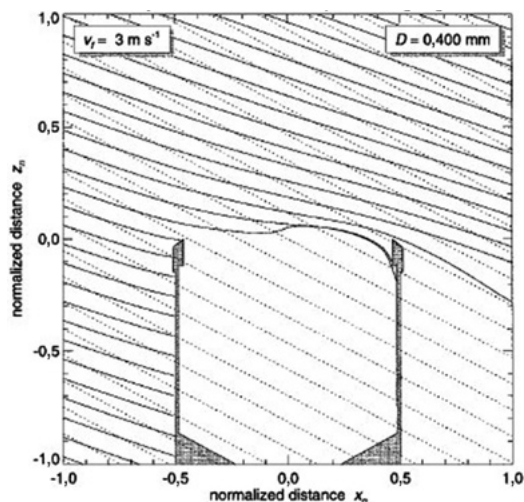


Figura 5. Trayectoria de la lluvia en la boca de un pluviómetro.

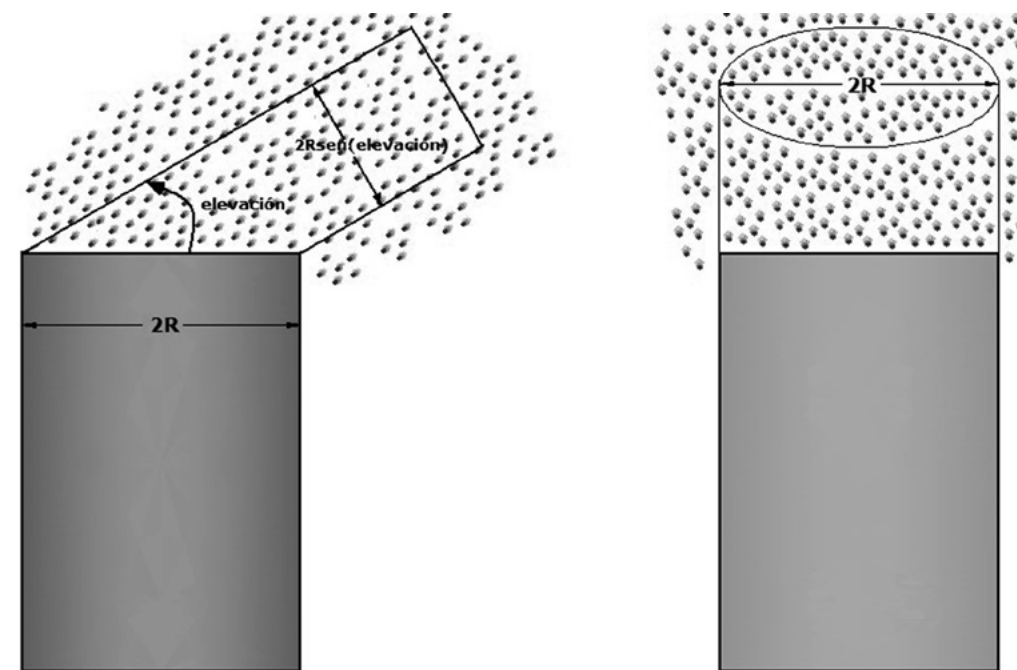


Figura 6. Superficie de captura del pluviómetro.

El coeficiente de corrección por este efecto sería:

$$k_r = \text{Área normalizada} / \text{Área de captación} = 1/\text{sen}(\text{elevación}) \quad (3)$$

elevación (°)	90	45	30	0
k_r	1	1,4	2	∞

5. DISEÑO DE UN NUEVO EQUIPO PARA LA MEDIDA DE LA PRECIPITACIÓN (MMP)

Se han aprovechado un conjunto de equipos sin uso en las redes de observación para montar un pluviómetro que se orienta a la lluvia manteniendo la boca del pluviómetro perpendicular a las gotas de lluvia y por lo tanto maximizando el área de captura. Al nuevo equipo se le ha llamado medidor móvil de precipitación (MMP).

Los elementos principales del mismo son:

- un equipo de medida de la velocidad y dirección de viento a unos 2 metros del suelo,
- un seguidor solar Kipp-Zonen 2AP configurado como posicionador,
- un *datalogger* (registrador de datos) Datataker DT800,
- un pluviómetro Thies 5.4032.30.008 colocado fijo en el suelo y
- un armazón de pluviómetro Hellman colocado sobre el seguidor solar.

El funcionamiento es simple:

- El anemo y la veleta pasan al *datalogger* las características del viento (dirección y velocidad) por encima de la boca del pluviómetro.
- El *datalogger* recoge estas mediciones de viento y calcula dos ángulos: el azimut y la elevación que pasa posicionador 2AP.

- Con los valores de azimut y elevación, el seguidor solar gira el armazón del pluviómetro Hellman para colocar su boca perpendicular a la lluvia.
- La lluvia recogida se trasvasa por un tubo de plástico al pluviómetro Thies que realiza la medida.
- El *datalogger* almacena los valores de viento y de precipitación.

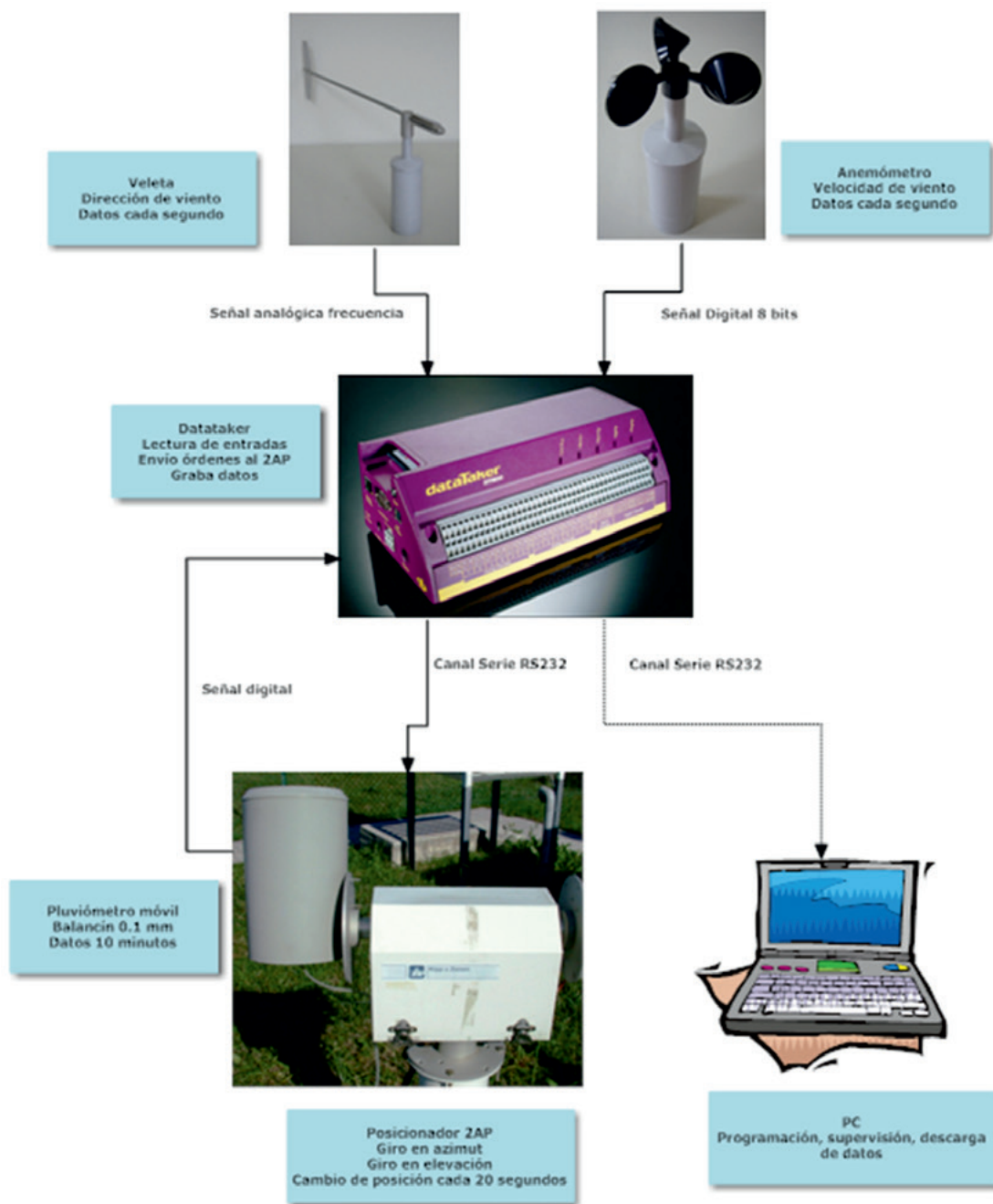


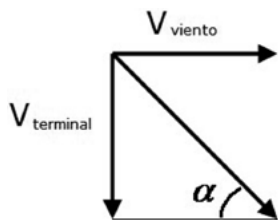
Figura 7. Diseño del MMP.



Figura 8. MMP colocado en el jardín meteorológico.

A la hora de orientar el pluviómetro hay que tener en cuenta estos detalles:

- El ángulo de azimut que se envía al posicionador es igual a la dirección del viento.
- Para calcular la elevación se ha de contar con el dato de la velocidad del viento en horizontal así como con la velocidad terminal de caída de las gotas de lluvia. No se ha dispuesto de equipos para medir este valor y se ha recurrido a la bibliografía para determinar los tamaños de gotas más comunes así como su velocidad de caída.



$$\text{elevación} = \alpha = \arctan (v_{\text{terminal}} / v_{\text{viento}})$$

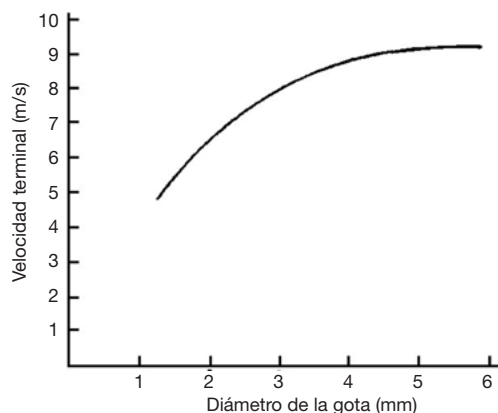


Figura 9. Tamaños de gota y velocidad terminal.

En LAWS (1941) se estudian los tamaños de gota más comunes y sus velocidades terminales.

En este trabajo se seleccionó un tamaño medio de las gotas de 4 mm y una velocidad terminal de 8 m/s.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Se ha tenido funcionando el MMP desde finales de 2009 hasta diciembre de 2021 en el jardín meteorológico de la Delegación Territorial de AEMET en Cantabria. Se tienen, por lo tanto, 626 832 datos diezminutales de velocidad de viento, dirección de viento y precipitación del MMP.

Las variables que se van a considerar son.

- OBS. Precipitación del observatorio de Santander. Observación manual (IH:1111).
- ESOS PF (pluviómetro fijo). Precipitación del pluviómetro de balancín del ESOS de Santander (IH:1111X). Resolución 0,2 mm.
- MMP PM (pluviómetro móvil). precipitación obtenida con el equipo de medida que se orienta a la lluvia. Resolución 0,1 mm.
- ESOS PFC (pluviómetro fijo corregido). El valor de la precipitación en 10 minutos se corrige con el dato de viento medio de 10 minutos del sensor de velocidad de viento colocado a 2 metros.
- (PM-PF)/PM. Porcentaje del exceso de precipitación en %.

$$PFC = k_r \text{ PF, donde } k_r = \sqrt{v_{\text{viento}}^2 + v_{\text{terminal}}^2} / v_{\text{terminal}} \quad (4)$$

Los valores agrupados por meses se muestran en la tabla de la figura 10.

Considerando los datos acumulados anuales se tiene:

Valores anuales	Máximo	Mínimo	Media
PM - PF (mm)	430,5	82,6	307,5
(PM - PF)/PF (%)	36,39	8,29	28,17

Para los valores acumulados mensuales:

Valores mensuales	Máximo	Mínimo	Media
PM - PF (mm)	156,9	-0,8	24,8
(PM - PF)/PF (%)	77,11	-1,69	23,98

En cuanto al dato diario, se usa una simplificación consistente en eliminar los días en los que la precipitación es superior a 5 mm que son poco interesantes para este trabajo. En ese caso se tienen 694 días a analizar.

Valores diarios	Máximo	Mínimo	Media
PM - PF (mm)	59,3	0	4,4
(PM - PF)/PF (%)	140,70	0	29,62

FECHA	OBS	ESOS PF	ESOS PFC	MMP PM	(%) PM-PF/PF	FECHA	OBS	ESOS PF	ESOS PFC	MMP PM	(%) PM-PF/PF
ene.-10	142,1	131,2	156,5	158,9	21,11%	ene.-11	80,4	78,0	79,4	78,7	0,90%
feb.-10	31,5	26,8	30,5	31,5	17,54%	feb.-11	81,9	79,5	92,7	94,2	18,49%
mar.-10	54,4	51,4	60,3	63,8	24,12%	mar.-11	51,8	53,6	60,8	61,2	14,18%
abr.-10	21,2	19,8	22,2	23,6	19,19%	abr.-11	35,1	34,5	37,5	39,1	13,33%
may.-10	89,2	76,7	97,9	102,8	34,03%	may.-11	23,4	21,7	23,0	27,7	27,65%
jun.-10	173,1	136,6	208,7	222,8	60,75%	jun.-11	44,4	39,4	46,4	46,5	18,02%
jul.-10	50,7	49,0	53,5	55,1	12,45%	jul.-11	82,6	77,7	92,1	97,7	25,74%
ago.-10	48,8	46,0	48,1	49,5	7,61%	ago.-11	41,4	41,4	44,5	45,2	9,18%
sep.-10	51,8	52,0	63,1	63,0	21,15%	sep.-11	35,0	35,0	39,9	38,0	8,57%
oct.-10	114,5	124,0	143,5	158,5	27,82%	oct.-11	61,1	58,4	66,8	71,8	22,95%
nov.-10	298,0	297,4	352,0	377,1	26,80%	nov.-11	94,9	100,0	116,8	114,8	14,60%
dic.-10	144,8	146,2	160,5	164,0	12,18%	dic.-11	119,5	130,6	146,5	156,7	21,52%
TOTAL	1216,1	1159,1	1394,74	1470,6	26,87%	TOTAL	751,5	749,8	846,51	873,4	16,48%
ene.-12	89,7	95,6	98,34	100,3	4,92%	ene.-13	193,9	206,0	254,56	266,9	39,27%
feb.-12	61,6	67,4	76,26	77,2	14,54%	feb.-13	160,0	168,3	205,19	241,8	43,67%
mar.-12	37,9	38,0	41,96	43,5	14,47%	mar.-13	64,3	65,4	75,34	77,2	18,05%
abr.-12	216,4	223,8	234,96	232,4	3,84%	abr.-13	132,3	129,6	165,56	181,6	40,12%
may.-12	70,0	71,2	73,35	74,8	5,08%	may.-13	136,1	140,6	165,30	182,8	30,01%
jun.-12	46,4	47,0	49,03	48,2	-1,69%	jun.-13	106,8	104,8	118,66	123,3	17,65%
jul.-12	32,3	34,0	35,00	33,8	-0,59%	jul.-13	22,8	21,9	24,18	24,2	10,50%
ago.-12	32,0	32,0	33,10	32,6	1,78%	ago.-13	44,9	42,4	48,91	53,8	26,42%
sep.-12	44,0	43,4	51,85	52,5	20,97%	sep.-13	71,1	68,6	72,65	81,3	18,51%
oct.-12	144,4	143,6	155,70	166,6	16,02%	oct.-13	30,0	30,0	33,83	37,3	24,33%
nov.-12	109,7	113,6	124,96	123,7	8,89%	nov.-13	171,5	172,4	205,05	238,0	38,05%
dic.-12	85,4	86,4	105,74	95,0	9,95%	dic.-13	68,7	70,0	78,61	86,1	23,00%
TOTAL	970,0	996,0	1080,3	1078,6	8,29%	TOTAL	1204,4	1220,0	1446,0	1614,1	32,30%
ene.-14	233,4	237,0	274,81	292,3	23,33%	ene.-15	145,8	147,8	174,78	242,1	63,80%
feb.-14	84,4	82,9	121,12	135,4	63,33%	feb.-15	236,2	232,6	264,06	368,8	58,56%
mar.-14	110,4	110,6	150,04	174,0	57,32%	mar.-15	113,0	107,6	113,94	153,5	42,66%
abr.-14	54,6	52,7	60,54	62,6	18,79%	abr.-15	31,6	32,2	32,55	32,9	2,17%
may.-14	50,4	48,6	51,08	62,2	27,99%	may.-15	20,5	22,0	23,19	24,3	10,45%
jun.-14	32,0	30,4	32,32	34,6	13,82%	jun.-15	39,8	38,6	38,31	41,4	7,25%
jul.-14	55,7	54,6	57,96	64,5	18,13%	jul.-15	43,4	40,0	46,35	47,8	19,00%
ago.-14	26,3	26,0	27,20	29,1	11,92%	ago.-15	82,9	82,4	86,12	91,7	11,29%
sep.-14	16,2	16,6	16,03	18,0	8,43%	sep.-15	100,6	102,2	101,49	110,7	8,32%
oct.-14	78,9	78,2	78,80	100,9	29,03%	oct.-15	79,3	81,2	85,09	94,5	16,38%
nov.-14	184,1	183,3	201,96	230,4	25,70%	nov.-15	65,9	72,4	80,13	101,5	40,19%
dic.-14	139,2	136,0	147,15	196,0	44,12%	dic.-15	16,2	15,8	19,00	20,5	29,75%
TOTAL	1065,6	1056,9	1219,0	1400,0	32,48%	TOTAL	977,2	974,8	1065,0	1329,5	36,39%
ene.-16	86,8	87,0	103,07	110,3	26,78%	ene.-17	56,1	56,8	70,75	100,6	77,11%
feb.-16	203,1	212,8	249,34	316,9	48,92%	feb.-17	53,5	56,4	66,74	75,0	32,98%
mar.-16	132,0	136,0	164,30	200,3	47,28%	mar.-17	79,9	77,0	86,94	103,2	34,03%
abr.-16	41,2	41,0	42,27	50,1	22,20%	abr.-17	27,6	28,2	30,72	36,2	28,37%
may.-16	53,2	51,8	55,17	61,2	18,15%	may.-17	74,4	72,8	76,05	86,9	19,37%
jun.-16	69,9	68,2	75,19	87,8	26,74%	jun.-17	47,2	46,0	50,57	57,5	25,00%
jul.-16	25,3	23,8	24,67	28,8	21,01%	jul.-17	20,1	20,0	21,26	24,9	24,50%
ago.-16	17,0	15,4	16,69	19,4	25,97%	ago.-17	62,0	60,0	63,86	75,5	25,83%
sep.-16	70,4	70,4	83,90	91,9	30,54%	sep.-17	152,7	150,4	165,96	194,0	28,99%
oct.-16	19,1	17,6	18,32	22,0	25,00%	oct.-17	22,6	20,4	21,63	28,3	38,73%
nov.-16	265,8	262,2	287,36	310,9	18,57%	nov.-17	137,4	135,8	144,92	170,1	25,26%
dic.-16	16,9	15,6	16,91	24,3	55,77%	dic.-17	263,3	263,8	344,01	375,2	42,23%
TOTAL	1000,7	1001,6	1117,2	1323,9	32,15%	TOTAL	996,6	967,6	1143,4	1327,4	34,41%
ene.-18	165,1	158,2	183,55	206,2	30,34%	ene.-19	203,3	209,6	266,84	278,7	32,97%
feb.-18	163,9	145,0	165,36	208,0	43,45%	feb.-19	41,8	44,6	62,13	76,3	71,08%
mar.-18	135,3	146,0	201,36	192,3	31,71%	mar.-19	22,4	23,0	27,18	26,1	13,48%
abr.-18	86,4	88,6	96,80	98,6	11,29%	abr.-19	104,7	102,6	121,11	120,3	17,25%
may.-18	79,3	80,2	87,82	92,6	15,48%	may.-19	60,5	58,6	69,90	70,8	20,82%
jun.-18	95,8	95,6	101,25	106,9	11,62%	jun.-19	54,6	51,8	55,09	61,2	18,15%
jul.-18	155,0	151,8	163,24	171,8	13,18%	jul.-19	65,1	60,4	62,61	68,1	12,75%
ago.-18	25,0	23,2	25,20	29,8	28,45%	ago.-19	46,7	44,6	47,07	52,7	18,16%
sep.-18	17,5	16,2	17,12	20,7	27,78%	sep.-19	33,6	34,4	45,22	58,7	70,64%
oct.-18	139,1	134,4	153,68	181,8	35,27%	oct.-19	199,8	193,0	226,78	277,7	43,69%
nov.-18	114,0	112,8	125,14	130,3	15,51%	nov.-19	332,2	336,4	449,45	469,8	39,60%
dic.-18	32,3	33,2	40,89	39,2	18,07%	dic.-19	126,6	131,8	158,18	161,1	22,23%
TOTAL	1208,7	1185,2	1361,4	1478,2	24,72%	TOTAL	1285,3	1290,8	1591,6	1721,3	33,35%
ene.-20	26,0	25,0	26,29	29,5	16,00%	ene.-21	226,1	211,0	234,96	247,3	17,20%
feb.-20	44,2	40,6	47,54	50,3	23,89%	feb.-21	81,1	77,6	87,84	90,2	16,24%
mar.-20	87,2	92,4	124,57	117,3	26,95%	mar.-21	19,9	20,2	24,70	24,5	21,29%
abr.-20	67,1	55,8	57,96	67,7	21,33%	abr.-21	32,9	32,2	34,30	37,7	17,08%
may.-20	46,7	44,4	47,30	50,5	13,74%	may.-21	84,8	86,2	92,21	90,6	5,10%
jun.-20	75,8	72,8	84,49	85,5	17,45%	jun.-21	126,0	124,2	136,75	141,8	14,17%
jul.-20	12,6	12,0	12,27	12,7	5,83%	jul.-21	73,4	75,2	79,15	79,3	5,45%
ago.-20	85,6	78,4	83,95	95,3	21,56%	ago.-21	53,5	52,6	56,48	59,9	13,88%
sep.-20	107,0	105,0	140,26	145,8	38,86%	sep.-21	81,9	81,6	85,67	89,5	9,68%
oct.-20	241,8	233,0	302,07	331,6	42,32%	oct.-21	67,9	65,2	77,26	78,4	17,18%
nov.-20	32,3	31,8	33,68	35,1	10,36%	nov.-21	283,7	291,2	334,25	346,2	18,89%
dic.-20	434,0	403,8	523,61	560,7	38,86%						
TOTAL	1280,3	1195,0	1485,9	1562,0	32,36%	TOTAL	1133,2	1117,2	1245,6	1283,4	14,88%

Figura 10. Datos mensuales del MMP.

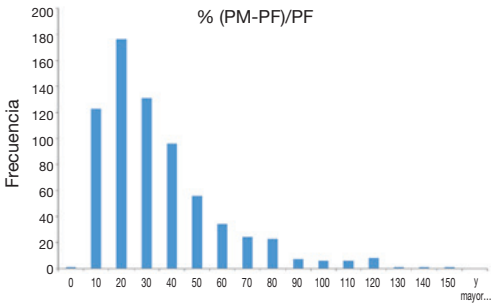


Figura 11. Histograma (PM-PF)/PF.

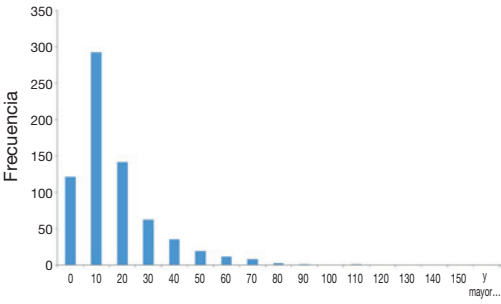


Figura 12. Histograma (PM-PFC)/PFC.

Si se hace una estadística de las diferencias diarias entre la PM y el valor corregido PFC se tiene:

Valores diarios	Máximo	Mínimo	Media
PM - PFC (mm)	34,8	-8,0	1,8
(PM - PFC)/PFC (%)	108,65	-29,83	11,09

Por último, se presentan unas gráficas con los valores de dos días destacados.

Día	PM (mm)	PF (mm)	PM-PF (mm)	%
23/10/2019	135,9	76,6	59,3	77,42

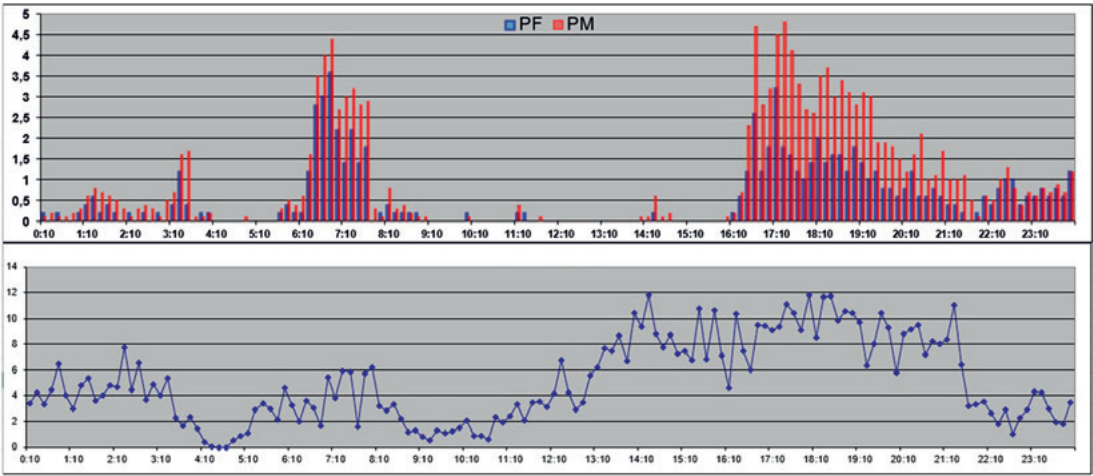


Figura 13. Precipitación (arriba) y velocidad de viento (abajo) del 23 de octubre de 2019.

Día	PM (mm)	PF (mm)	PM-PF (mm)	%
30/01/2015	76,9	39,8	37,1	93,22

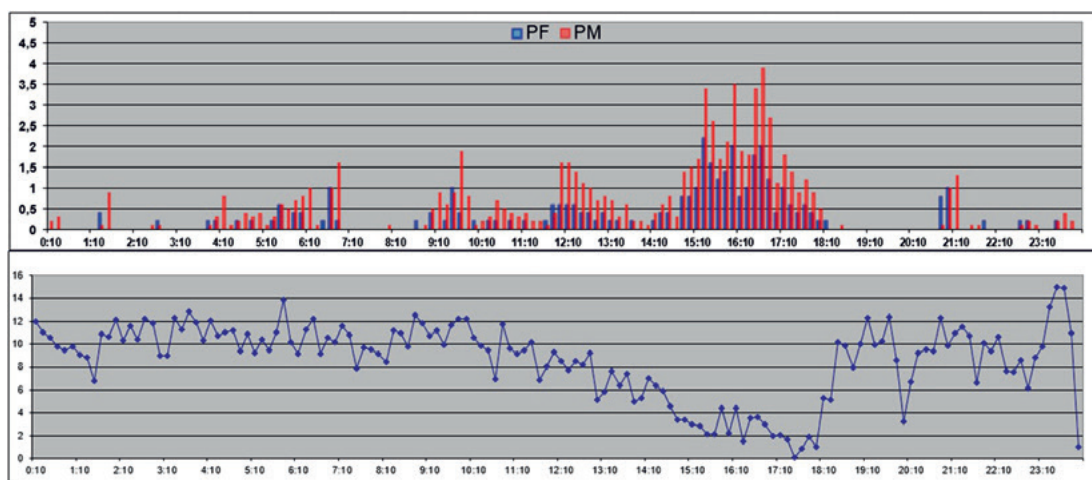


Figura 14. Precipitación (arriba) y velocidad de viento (abajo) del 30 de enero de 2015.

7. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un equipo capaz de mejorar la medida de la precipitación líquida en condiciones de vientos moderados. Con ayuda de este equipo se ha podido cuantificar el orden de magnitud con que se está subestimando la precipitación. No se han producido episodios de nevadas importantes en Santander durante el estudio, por lo que todos los datos son de precipitación líquida.

Se ha visto que aplicando un factor k_r a la medida de los pluviómetros se mejora bastante la medida de los pluviómetros de captura.

Volviendo a recordar la ecuación (1) y cambiando la nomenclatura para adaptarla a este estudio se tiene que:

$$P = k_d \times k_r \times PF = k_d \times PFC \quad (5)$$

El hecho de que PM sea mayor que PFC indica que con la orientación de la boca del pluviómetro se está mejorando la aerodinámica del pluviómetro y disminuyendo las pérdidas por deformación del campo de viento debido a la presencia de un obstáculo y así el valor de PM se acercará más al valor ideal P.

El sistema montado es francamente mejorable. Por un lado en cuanto a la infraestructura, hay que tener en cuenta que está realizado con equipos fuera de uso y no se ha realizado un diseño a medida; y por otro, en relación con el fundamento teórico también se utiliza un valor constante de velocidad terminal sacado de un artículo y ese valor no será el correcto en todas las situaciones meteorológicas.

Entre las líneas de trabajo que se pueden seguir para mejorar el sistema MMP y que se pueden acometer con medios de la AEMET cabe señalar el uso de los disdrómetros de los ESOS para obtener valores de tamaño de gota y velocidad terminal y la comparación con un DFAR.

AGRADECIMIENTOS

A José Montero y Rafael Vicente, del Centro Radiométrico de AEMET, que han confiado en que esta idea se pudiera llevar a cabo y me han suministrado algunos de los equipos necesarios. A Ana María Alonso por su ayuda en la captura de las observaciones y por sus consejos en el desarrollo del estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- LAW, J. O. (1941). Measurements of the fall velocity of water drops and rain drops. *Transactions American Geophysical Union. Hydrology*, 22, 709-721.
- NESPOR, V. y SEVRUK, B. (1999). Estimation of wind-induced error of rainfall gauge measurements using a numerical simulation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 16, Issue 4, 450-464.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) (1998). WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison. Final Report. WMO/TD N° 872.