

## APLICACIÓN DEL COEFICIENTE DE INCONSISTENCIA COMO CRITERIO DE COMPARACIÓN ENTRE MEDICIONES *CONVENCIONALES* Y *AUTOMÁTICAS* DE LLUVIA DIARIA

*Eva Colotti B., Andrés Blanco T.  
y Jorge Rodríguez G.\**

### **Resumen:**

En Venezuela, los organismos que administran redes meteorológicas como el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN), la Fuerza Aérea Venezolana (FAV), la Armada Venezolana y Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y Electrificación del Caroní (CVG-Edelca), entre otros, han iniciado la sustitución de los equipos convencionales de medición por mecanismos automáticos. Sin embargo, ésta sustitución instrumental sería procedente una vez que se hayan comparado simultáneamente las dos sucesiones de medidas, dado que, al evaluar la situación descrita, y haberse decidido eliminar el instrumental convencional, se genera un nuevo conjunto de datos que debería acoplarse a los registros antiguos medidos convencionalmente. Así, se propone un criterio para decidir si es necesario hacer ajustes a los nuevos datos automáticos con respecto a los convencionales o, equivalentemente, si es necesario posponer la eliminación del dispositivo convencional hasta que haya certeza en que las mediciones automáticas son fiables. El Error Cuadrático Medio ( $E_{CM}$ ) fue seleccionado como un índice base en la toma de la decisión respectiva, habiéndose demostrado que  $E_{CM} = V(X) + V(X^*) - 2 C(X, X^*)$ , donde  $E_{CM} = V(X - X^*) =$

---

\* Universidad Central de Venezuela (UCV), Facultad de Humanidades y Educación, Escuela de Geografía, Departamento de Geografía Física, Laboratorio de Climatología, Ciudad Universitaria, Caracas. 1041-A. Venezuela. E-mail: ecolotti@cantv.net; andeloblant@yahoo.com; jorgpino@yahoo.es.

varianza de las diferencias de mediciones automáticas y convencionales,  $V(X) =$  varianza de la medición convencional,  $V(X^*) =$  varianza de la medición automática y  $C(X, X^*) =$  covarianza entre mediciones convencional y automática. Bajo la hipótesis de que  $E(X) = E(X^*)$ , se concluye en que el cociente  $V(X-X^*) [V(X) + V(X^*)]$ , cuantifica el grado de inconsistencia entre los conjuntos muestrales provenientes de mediciones convencional y automática. Este cociente, denominado Coeficiente de Inconsistencia (acrónimo,  $C_I$ ), varía entre valores 0 (inconsistencia nula o consistencia máxima) y 1 (inconsistencia máxima o consistencia nula) y permitirá medir en el grado en que mediciones simultáneas bajo distintos criterios de medición son pertinentes. En ese orden de ideas, se aplicó el  $C_I$  a una estación pluviométrica de EDELCA para sugerir la desincorporación o no del equipo convencional de medición.

**Palabras claves:**

Error cuadrático medio, mediciones automática y convencional, coeficiente de inconsistencia, precipitación, varianza.

\*\*\*\*\*

**Abstract:**

At the moment, in Venezuela, the organisms that administer meteorological network are the Ministry of the Environment and of the Natural Resources (MARN), the Venezuelan Air Force (FAV), the Venezuelan Navy, National Institute of Agricultural Investigations (INIA) and Caroní Electricity Company (CVG-Edelca), among others; they have begun the substitution of the conventional equipment of measurement for automatic mechanisms. However, this instrumental substitution would be reasonable once they have been compared the 2 successions of measures simultaneously, since, once evaluated the described situation, and to be had resolved to eliminate the conventional instrumental, it will generate a new group of data that should be coupled to the old registrations measured conventionally. This way, we intend an approach to decide if it is necessary to make adjustments to the new automatic data with regard to the conventional ones or, equivalently, if it is necessary to postpone the elimination of the conventional device until there is certainty that the automatic measurements are reliable. It was selected to the Mean Quadratic Error ( $E_{CM}$ ) as an index it bases on the taking of the respective decision, there being demonstrated you that  $ECM = V(X) + V(X^*) - 2C(X, X^*)$ , where  $E_{CM} = V(X-X^*) =$  variance of the differences of automatic and conventional measurement,  $V(X) =$  variance of the conventional measurement,  $V(X^*) =$  variance of the automatic measurement and  $C(X, X^*) =$

covariance among conventional and automatic measurements. Under the hypothesis that  $E(X) = E(X^*)$ , we conclude in that the quotient  $V(X-X^*) / [V(X) + V(X^*)]$ , it quantifies the grade of inconsistency among the groups you show them coming from conventional and automatic measurements. This quotient, denominated Coefficient of Inconsistency (CI), it varies among 0 (null inconsistency or maximum consistency) and 1 (maximum inconsistency or null consistency) and it will allow to measure in the grade in that simultaneous measurement under different approaches are pertinent. In that order of ideas, the CI was applied to a rain gauge of EDELCA to suggest the elimination or not of the conventional instruments of measurement.

**Key words:**

Mean Quadratic Error, automatic and conventional measurements, Coefficient of Inconsistency, precipitation, variance.

\*\*\*\*\*

## **INTRODUCCIÓN**

Se hace cada vez más frecuente, entre los organismos que administran la compilación de datos meteorológicos, la sustitución de los equipos convencionales de medición por mecanismos automáticos. Sin embargo, la experiencia que han recabado los autores en el análisis de las series convencionales y automáticas ha determinado que la sustitución de aparatos sería procedente una vez que se hayan comparado tales sucesiones y no proceder a la eliminación de los instrumentos convencionales sin haber realizado una evaluación simultánea de ambas series debido a que, habiendo decidido eliminar el instrumental convencional, se genera un nuevo conjunto de datos que deberían acoplarse a los registros antiguos medidos convencionalmente.

## FORMULACIÓN MATEMÁTICA

En ese orden de ideas se propone un criterio para decidir si es necesario o no hacer ajustes a los nuevos datos automáticos con respecto a los convencionales o, equivalentemente, si es necesario posponer la eliminación del dispositivo convencional hasta que haya certeza de que las mediciones automáticas son fiables.

Con base a Chacín (1998) se definirá al ECM mediante la siguiente expresión:

$$E_{CM} = E(X - X^*)^2 \quad (1)$$

donde,

$E$  = representa el operador estadístico-matemático de la Esperanza Matemática o Valor Esperado.

$X$  = medición convencional

$X^*$  = medición automática

$E_{CM}$  = error cuadrático medio

Convéngase en que  $X - X^* = Z$ , es admisible plantearse la siguiente expresión:

$$V(X - X^*) = V(Z) = E(Z^2) + [E(Z)]^2 \quad (2)$$

donde,

$V$  = representa el operador estadístico-matemático de la varianza.

Ahora bien, si se conviene en que tanto los datos medidos de manera convencional (equipo mecánico) y los datos medidos automáticamente (equipo electrónico) tienen igual valor esperado, es decir, están centrados alrededor del mismo valor se tiene que:

$$\begin{aligned}
 & E(X) = E(X^*) \\
 \therefore & E(X) - E(X^*) = 0 \quad (3) \\
 \Rightarrow & E(X - X^*) = E(Z) = 0
 \end{aligned}$$

Lo anterior significa que es factible que si ambos equipos están midiendo el mismo fenómeno, después de repetidas mediciones el valor esperado coincida para ambos grupos muestrales. En otras palabras, se está considerando que ambas muestras provienen de poblaciones de igual valor esperado. En consecuencia, admitido que  $E(X) = E(X^*)$ , la ecuación (2) queda como:

$$V(X - X^*) = V(Z) = E(Z^2) = E(X - X^*)^2 = E_{CM} \quad (4)$$

En resumen, el  $E_{CM}$  es equivalente a  $V(X-X^*) \Leftrightarrow$  que ambas poblaciones tienen igual valor esperado. Esta prescripción tiene basamento práctico dado que, se está midiendo el mismo meteoro con distintos equipos en cuanto a la tecnología de medición, pero donde se supone están exentos de error de calibración.

En otro orden de ideas, también se conoce que la varianza de la diferencia de variables tiene la siguiente estructura algebraica:

$$V(X - X^*) = V(X) + V(X^*) - 2C(X, X^*) \quad (5)$$

donde,

$$C(X, X^*) = \text{Covarianza entre } X \text{ y } X^*$$

Si el valor esperado de las mediciones mecánicas y electrónicas fuese el mismo, implicará que la varianza de las diferencias de las mediciones será equivalente al error medio cuadrático; luego, (5) resultará como:

$$V(X - X^*) = E_{CM} = V(X) + V(X^*) - 2C(X, X^*) \quad (6)$$

Dividiendo ambos miembros de la ecuación (5) entre la suma algebraica de la ecuación (6):

$$\frac{V(X - X^*)}{V(X) + V(X^*) - 2C(X, X^*)} = 1 \quad (7)$$

Supóngase ahora que no exista correlación lineal entre los dos conjuntos de mediciones. Ello significará que  $C(X, X^*) = 0$ . Se tendrá, que:

$$\frac{V(X - X^*)}{V(X) + V(X^*)} = 1 \quad (8)$$

Nótese que si  $r = 0$ , no existe correlación lineal alguna entre los conjuntos muestrales y, por tanto, las mediciones son relativamente independientes. Es decir, existe una total incompatibilidad o inconsistencia entre los registros mecánicos y electrónicos. Tal cociente se denominará Coeficiente o Índice de Inconsistencia, el cual se simbolizará como  $C_I$  y se expresará mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{V(X - X^*)}{V(X) + V(X^*)} = C_I \quad (9)$$

Si la correlación lineal  $r$  fuese igual a 1, implica que  $X = X^*$  y, por ende,  $V(X - X^*) = 0$ , ello significa que el Índice de Inconsistencia, según la fórmula (8) es cero.

En síntesis, el Coeficiente de Inconsistencia variará del siguiente modo:

Si  $r(X, X^*) = 1 \implies C_I = 0 \implies$  muestras linealmente dependientes

Si  $r(X, X^*) = 0 \implies C_I = 1 \implies$  muestras totalmente independientes

¿Pero qué sucede cuando la correlación lineal da valores entre 0 y 1?. Para que haya una correspondencia monotónica entre el índice y el grado de correlación admitiendo la participación indirecta del término  $-2C(X, X^*)$ , se aplicará la misma relación (9) para los casos intermedios de correlación. Nótese que si hay correlación lineal distinta de 0 y de 1, la varianza de la diferencia se repartirá entre  $V(X)$  y  $V(X^*)$ , las cuales aditivamente serán mayores en la medida que la correlación aumente, determinando que  $C_I$  disminuya hacia el umbral 0, es decir, hacia el límite de dependencia lineal total. Ello implicará, que pese a la no inclusión del término covarianza en el denominador el coeficiente  $C_I$  mantendrá el significado que se le ha asignado.

Obviamente, la exclusión del término covarianza en la expresión final del coeficiente  $C_I$  determinará que éste se comporte como un índice categórico ordinal y no como una magnitud de una escala superior a la ordinal.

Podría ampliarse el concepto de inconsistencia incorporando el de consistencia; entre ellos existiría la siguiente relación matemática:

$$C_C + C_I = 1 \quad (10)$$

De inmediato surge la relación:

$$C_C = 1 - C_I \quad (11)$$



Multiplicando por 100 ambos miembros de la igualdad (11), resulta:

$$C_c (\% ) = 100 - 100 * C_I \quad (12)$$

Mediante (11) se estaría en disposición de conocer el grado de consistencia entre las dos muestras de datos, de modo que ahora el usuario puede tomar la decisión si la cuantía de consistencia, en la comparación, es razonablemente aceptable o no.

### **COMPARACIÓN DE DATOS DE LLUVIA DIARIA**

La aplicación de la fórmula del Coeficiente de Inconsistencia ( $C_I$ ), y del Coeficiente de Consistencia ( $C_C$ ) se realizó sobre en datos de lluvia diaria de 1999 de la estación Arekuna ( $6^\circ 31' N - 62^\circ 53' W$ ; 333 m s n m), suministrados por la empresa EDELCA. A tal efecto se realizaron comparaciones, para cada mes del año, de registros provenientes de un equipo convencional (pluviógrafo de sifón Fuess; con precisión de la medición de 0,1 mm) y de un equipo automático (con precisión de 0,01 pulg.), estos últimos previamente convertidos a milímetros. Sólo se tomaron como valores comparables aquellos días con lluvia; seguidamente se muestran los resultados obtenidos según la descripción anterior (Cuadro 1).



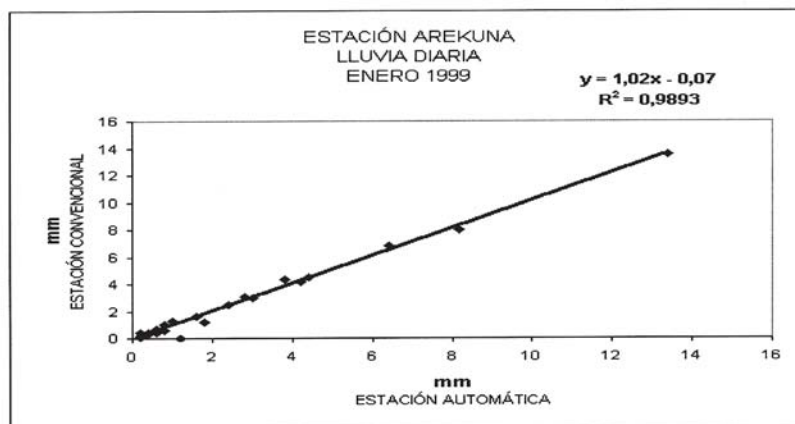
**Cuadro 1**  
**Coefficientes de Inconsistencia y de Consistencia resultantes**  
**de la comparación de lluvia diaria en la estación Arekuna.**  
**C.V.G. Edelca**

	<b>ENE</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>ABR</b>	<b>MAY</b>	<b>JUN</b>
Días de Lluvia	24	14	8	14	15	26
Coef de Inconsistencia	0,0057	0,0001	0,0102	0,0005	0,0094	0,0005
Coef de Consistencia (Cc)	0,9943	0,9999	0,9898	0,9995	0,9906	0,9995
Cc (%)	99,4305	99,9888	98,9770	99,9531	99,0576	99,9469
	<b>JUL</b>	<b>AGO</b>	<b>SEP</b>	<b>OCT</b>	<b>NOV</b>	<b>DIC</b>
Días de Lluvia	29	27	24	22	12	20
Coef de Inconsistencia	0,0024	0,0008	0,0005	0,0008	0,0012	0,0054
Coef de Consistencia (Cc)	0,9976	0,9992	0,9995	0,9992	0,9988	0,9946
Cc (%)	99,7566	99,9187	99,9522	99,9162	99,8826	99,4580

Nótese que el  $C_1$  está comprendido entre 0,00011 y 0,0102, mientras que su complemento, el Cc, se extiende desde 98,977% hasta 99,9888%, es decir, existe una consistencia relativamente alta, entre las mediciones registradas simultáneamente por los equipos de tecnologías convencional y automática, si se considera que el máximo valor del Cc (en%) es de 100%.

En síntesis, el Cc permite concluir que el registro simultáneo de mediciones de lluvia diaria se hizo bajo un control de calidad instrumental adecuado y la sustitución de un equipo por el otro, con el propósito de tener solamente en funcionamiento el instrumental automático, es una decisión razonable.

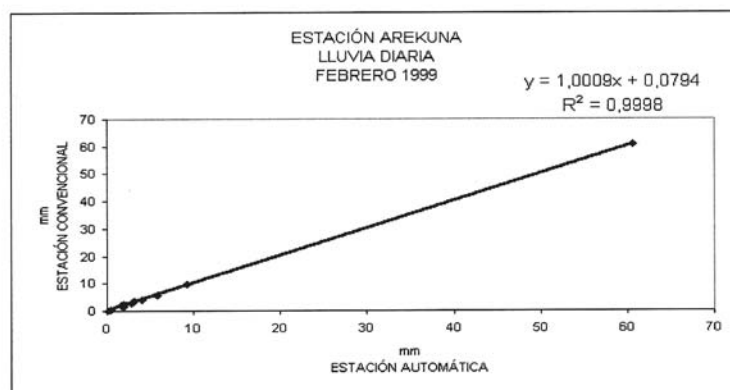
Con fines de ilustrar con más detalles los resultados compilados en el cuadro anterior, se presentan los diagramas de dispersión de la medición simultánea de lluvia.



Coefficiente de Inconsistencia = 0,0057

Coefficiente de Consistencia (Cc) = 0,9943

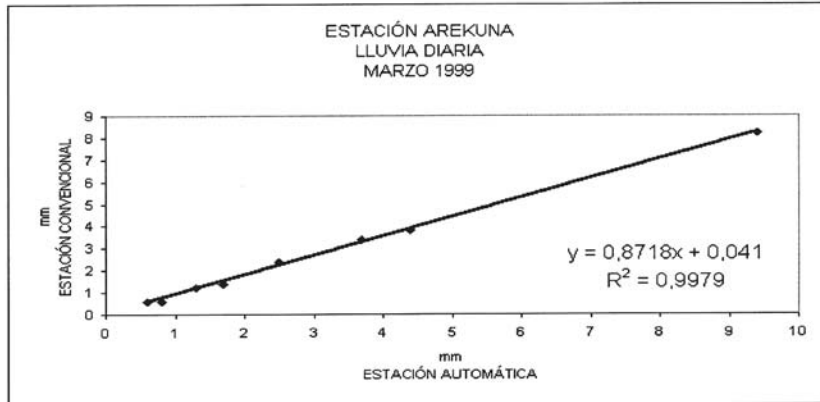
Cc (%) = 99,431
-----------------



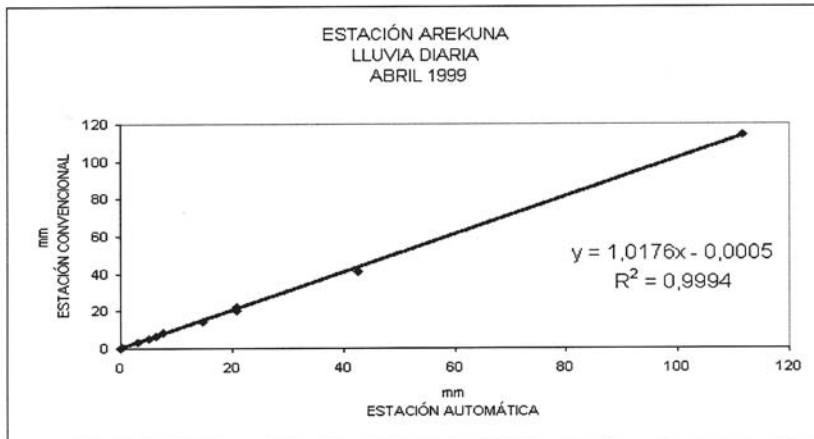
Coefficiente de Inconsistencia = 0,0001

Coefficiente de Consistencia (Cc) = 0,9999

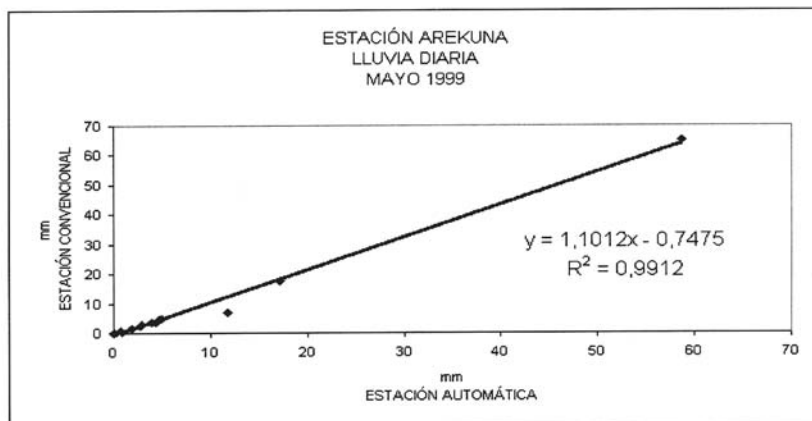
Cc (%) = 99,989
-----------------



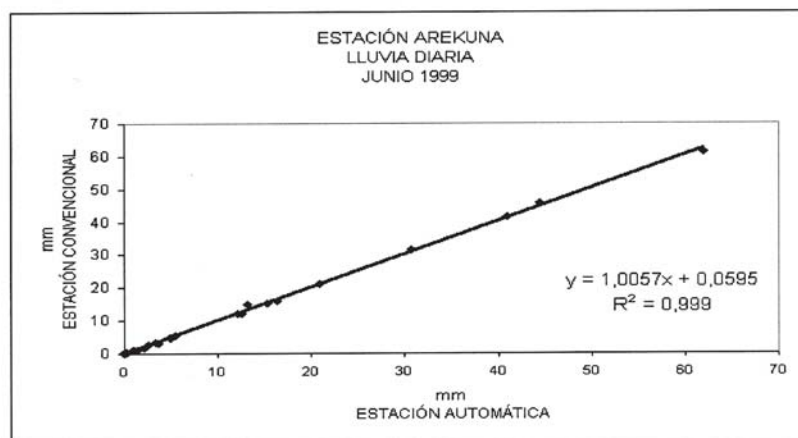
Coeficiente de Inconsistencia	= 0,0102
Coeficiente de Consistencia (Cc)	= 0,9898
	Cc (%) = 98,977



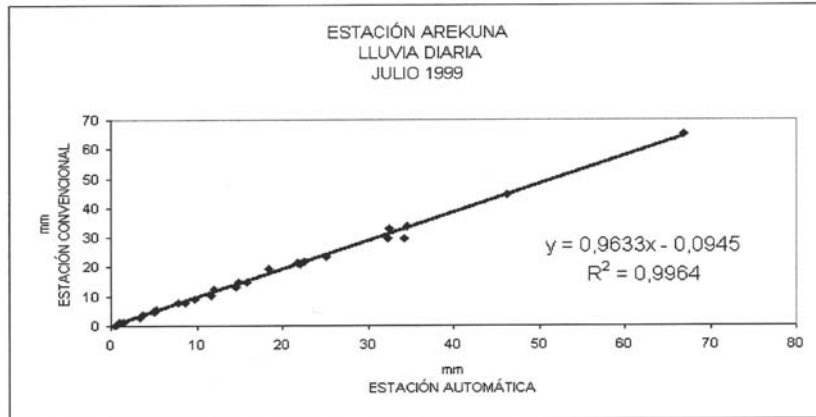
Coeficiente de Inconsistencia	= 0,0005
Coeficiente de Consistencia (Cc)	= 0,9995
	Cc (%) = 99,953



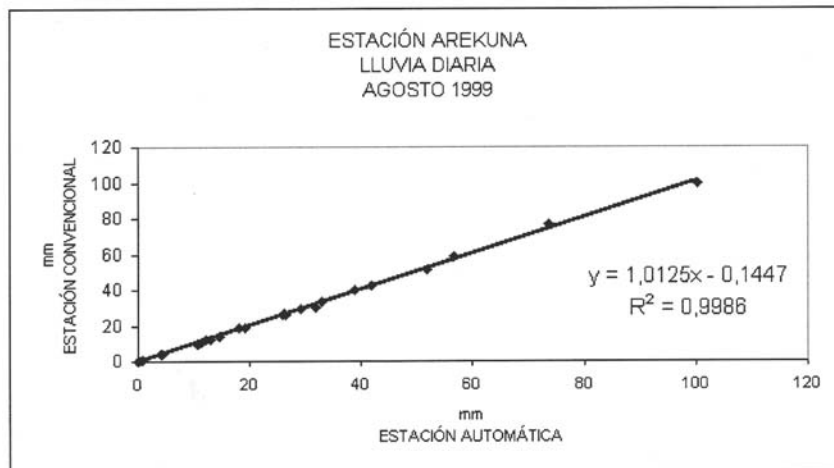
Coeficiente de Inconsistencia = 0,0094	
Coeficiente de Consistencia (Cc) = 0,9906	
	Cc (%) = 99,058



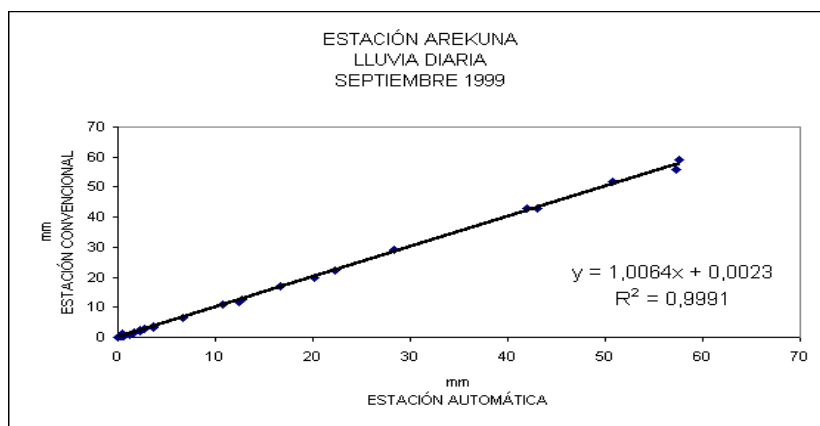
Coeficiente de Inconsistencia = 0,0005	
Coeficiente de Consistencia (Cc) = 0,9995	
	Cc (%) = 99,947



Coeficiente de Inconsistencia = 0,0024	
Coeficiente de Consistencia (Cc) = 0,9976	
	Cc (%) = 99,757



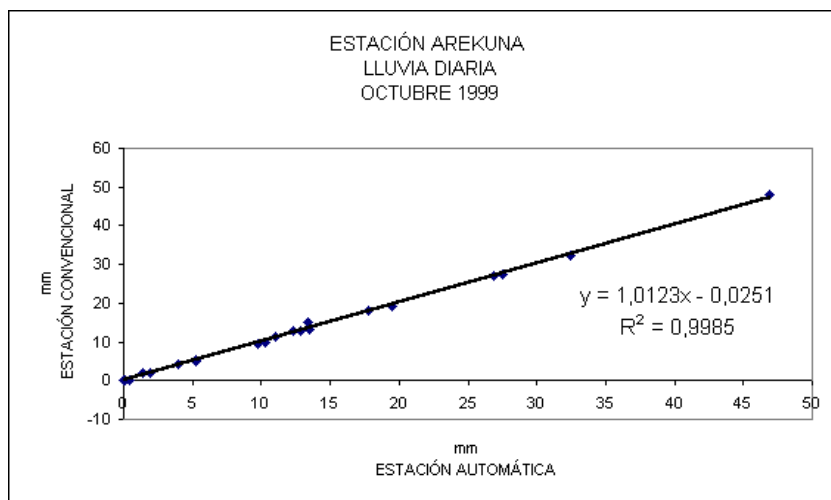
Coeficiente de Inconsistencia = 0,0008	
Coeficiente de Consistencia (Cc) = 0,9992	
	Cc (%) = 99,919



Coeficiente de Inconsistencia = 0,0005
--

Coeficiente de Consistencia (Cc) = 0,9995
---

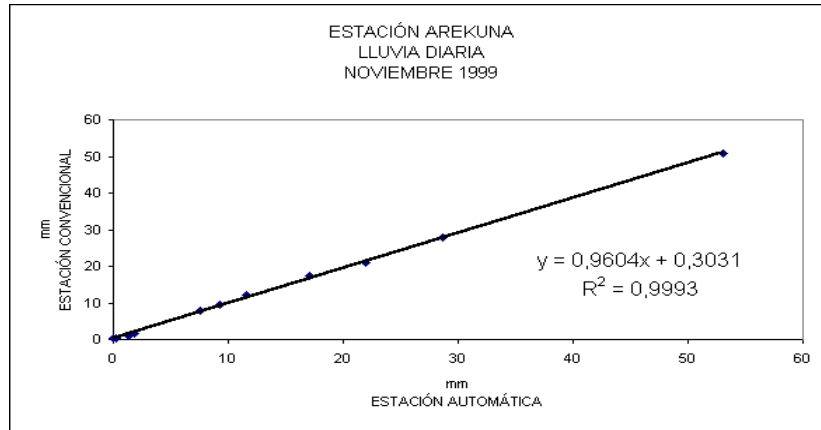
Cc (%) = 99,952
-----------------



Coeficiente de Inconsistencia = 0,0008
--

Coeficiente de Consistencia (Cc) = 0,9992
---

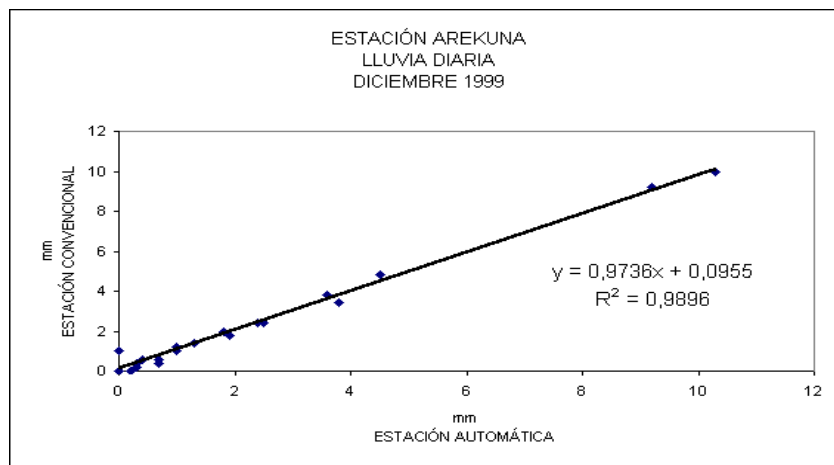
Cc (%) = 99,916
-----------------



Coeficiente de Inconsistencia = 0,0012
--

Coeficiente de Consistencia (Cc) = 0,9988
---

	Cc (%) = 99,883
--	-----------------



Coeficiente de Inconsistencia = 0,0054
--

Coeficiente de Consistencia (Cc) = 0,9946
---

	Cc (%) = 99,458
--	-----------------



En todos los meses la relación lineal resultó estadísticamente significativa al nivel del 5%, denotando ello que la simultaneidad del registro es consistente.

## CONCLUSIONES

El Coeficiente de Inconsistencia, y su contraparte el Coeficiente de Consistencia, de acuerdo a los resultados logrados, parecen ser índices adecuados para evaluar la calidad de mediciones simultáneas de lluvia diaria registradas con tecnología instrumental distinta. En ese orden de ideas, otros autores han propuesto índices de comparación entre mediciones correspondientes -por ejemplo Nash y Sutcliffe (1970); Cook et al (1994); Cochrane y Flanagan (1999); Tiwari et al (2000); Schmidli et al (2001) y Tolk y Howell (2001). Así mismo, la sencillez de las fórmulas es una cualidad que puede inducir a un amplio uso de esos coeficientes en situaciones similares tanto en la lluvia como en otras variables meteorológicas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chacín, L. F. 1998. Comparaciones teóricas y prácticas y Análisis en tiempo y/o espacio de los diseños de superficies de respuesta. *Revista Alcance*, 54. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela.
- Cochrane, T. A. y D. C. Flanagan. 1999. Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models. *Journal of Soil and Water Conservation*. Fourth Quarter, 678 - 685.
- Cook, E. R., K. R. Briffa y P. D. Jones. 1994. Spatial regression methods in dendroclimatology: a review and comparison of two techniques. *International Journal of Climatology*, 14, 379 - 402.
- Nash, J. E. y J. V. Sutcliffe. 1970. River forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282 - 290.

- Schmidli, J., Ch. Frei y Ch. Schär. 2001. Reconstruction of mesoscale precipitation fields from sparse observations in complex terrain. *Journal of Climate*, 14, 3289 - 3306.
- Tiwari, A. K., L. M. Risse y M. A. Nearing. 2000: Evaluation of WEPP and its comparison with USLE and RUSLE. *Transactions of the ASAE*, 43 (5), 1129 -1135.
- Tolk, J. A. y T. A. Howell. 2001. Measured and simulated evapotranspiration of grain sorghum grown with full and limited irrigation in three high plains soils. *Transactions of the ASAE*, 44 (6), 1553 - 1558.