

METODOLOGÍA DEL RACIONALISMO CRÍTICO Y CAMBIOS TEÓRICOS. EL CASO DE LA METROLOGÍA

Julio ORTIGALA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, MENDOZA (ARGENTINA)
julioortigala@yahoo.com.ar

Guillermo CUADRADO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO (ARGENTINA)
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL, MENDOZA (ARGENTINA)
guille@logos.uncu.edu.ar

Resumen: La metodología del *racionalismo crítico* permite ajustar una teoría cuando aparecen problemas. En metrología surgieron nuevas exigencias para las mediciones que provienen de los mercados globalizados. Esa situación está provocando el desplazamiento de la concepción *tradicional* por la teoría de *incertidumbre*. Este trabajo examinó ese cambio, evaluando ambas teorías y determinando sus aproximaciones a la verdad y los motivos para cambiarlas. Se realizó un análisis lógico de la bibliografía especializada para determinar la preferencia teórica. Se concluyó que la teoría de la *incertidumbre* es más confiable, porque define mejor *mensurando* y *condiciones de medición*. Las certificaciones de *trazabilidad* documentan las calibraciones periódicas de los instrumentos de medición, garantizando la verdad como criterio regulador, para que mantengan su validez y confiabilidad. Además, el *racionalismo crítico* permitió evaluar este cambio en metrología como una evolución en el mundo del conocimiento objetivo.

Palabras clave: error, incertidumbre, metrología, veracidad.

Abstract: The methodology of *critical rationalism* fits a theory when problems appear. In metrology new requirements arose for the measurements that come from the encompassed markets. This situation is provoking the

displacement of the *traditional* conception for the *uncertainty* theory. This work examined this change, evaluating both theories and determining its approaches to the truth and the motives for changing them. A logical analysis was realized of specializing literature to determine the theoretical preference. One concluded that the theory of the *uncertainty* is more reliable, because it defines better *measured object* and *measurement conditions*. The *traceability* certifications document the periodic calibrations of the measuring devices, guaranteeing the truth like regulatory criterion, so that they maintain its validity and reliability. Also, the *critical rationalism* allowed to evaluate this change in metrology as an evolution in the world of the objective knowledge.

Keywords: error, uncertainty, metrology, veracity.

1. Introducción

En Estadística existe un conjunto de afirmaciones aceptado y estable que provee un conocimiento de fondo no problemático. Sin embargo en ciertas publicaciones se observa la tendencia a reemplazar la teoría tradicional de errores por otra vinculada a la *incertidumbre*. Todo indica que se está operando un cambio conceptual de las prácticas estadísticas referidas a la metrología científica e industrial. Este cambio puede analizarse con los elementos metodológicos del *racionalismo crítico*, como el *examen crítico* de las teorías, la noción de *verosimilitud* y de *verdad interesante*, que explica y da respuesta a los problemas, frente a una verdad con escaso contenido informativo.

Conviene recordar que a partir de 1960 se impuso el Sistema Internacional de Medidas (SI), que brinda uniformidad y coherencia a todas las mediciones científicas y tecnológicas. Vale la pena decir que las teorías empíricas, por lo general, se vinculan con la realidad a través de las mediciones. Éstas proveen los valores que toman las variables, para describir y representar el fenómeno estudiado por la teoría. Sin embargo, en el ámbito de los procedimientos, no existe todavía una metodología para tratar el fenómeno de la variabilidad, lo que significa un problema por resolver, que afecta a las mediciones y con ello a las descripciones de la realidad.

Cabe agregar, que cuando los mercados tenían dimensiones locales, desde el punto de vista geográfico, cualquier sistema de unidades unificado satisfacía la necesidad de medir. Pero los desarrollos tecnológicos en simbiosis con los procesos de globalización han generado nuevas necesidades de precisión en las mediciones y en los procedimientos para realizarlas. En ese

sentido ya existen indicios sobre el empleo de un método que permita comparar fácilmente mediciones realizadas en diferentes partes del mundo.

En relación con ello, en los últimos años, ciertas publicaciones orientadas a la metrología científica e industrial, como el Vocabulario Internacional de Metrología (2008), la guía ISO (2005) sobre “Procedimiento para la evaluación de la incertidumbre de medición” y la Norma ISO 5725 (2006) tienen la orientación señalada. En ellas se observa la tendencia a reemplazar la teoría tradicional de errores por otra vinculada a la incertidumbre 1.

Ahora bien, en el esquema del racionalismo crítico, los problemas nuevos producen construcciones que provocan nuevos hechos o problemas inesperados. Además, los errores y contradicciones que surgen se eliminan con la crítica regulada por la búsqueda de la verdad. Con este marco epistemológico, este trabajo compara la teoría tradicional de errores en las mediciones con la de *incertidumbre*.

Por cierto, toda medición debe tener *validez* y *confiabilidad*. La primera determina la aproximación a la medida que se busca y está regulada por el propósito, mientras que la segunda asegura que el procedimiento de medir está bien aplicado. Así mismo, cualquier medición depende del sistema que forman el *mensurando*, el *instrumento*, el *operador* y ciertas variables que provienen de las influencias del medio ambiente. Las tres primeras intervienen necesariamente, mientras que las últimas pueden obviarse o no, de acuerdo con la precisión requerida de medición. Este último aspecto es el que influye sobre la *veracidad* de la medida, por ejemplo, el empuje del aire puede ser significativo cuando se pesan objetos que tienen poca masa, como el poliestireno expandido, y deja de serlo cuando ésta aumenta significativamente, como es el caso del acero.

Este trabajo se enmarca dentro de una línea investigación orientada a analizar los problemas epistemológicos de teorías científicas y a determinar sus efectos en la actividad tecnológica. Se enfatiza la teoría porque es la que explica y unifica los más variados casos prácticos.

En relación con lo expresado, el propósito de este trabajo es evaluar dos teorías, la *concepción tradicional* o del *valor verdadero* y la de *incertidumbre*, examinando las condiciones de aproximación a la verdad y determinando el motivo del cambio teórico. También se buscan, en la bibliografía especializada, los criterios que impulsan la preferencia por la teoría de la incertidumbre.

1) HALL, B.D. y WILLINK, R., “Does “Welch-Satterthwaite” make a good uncertainty estimate?” en *Metrologia*, (2001), 38, pp. 9-15.

Asimismo se indaga su efecto en los ámbitos donde se realizan mediciones, considerando que los cambios teóricos pronto irrumpen en las más diversas ramas científicas y tecnológicas.

Hechas esas consideraciones, este artículo presenta ciertas funciones del lenguaje, la crítica y los criterios de veracidad. También se examinan la *confiabilidad* y la *validez* de un sistema de medición; la *incertidumbre*, como propiedad cuantificable del resultado de una medición; la teoría de errores tradicional y la de la *incertidumbre*. Se analizan ciertos términos de esta última como la *trazabilidad*, que relaciona calibraciones sucesivas; *exactitud*, que aumenta al reducirse la *incertidumbre*; y *sesgo* de un sistema de medición, cuya determinación requiere de comprobaciones periódicas de repetibilidad.

2. Funciones del lenguaje, crítica y aproximación a la verdad

Karl Popper divide el mundo en tres categorías: *mundo 1*, de los objetos físicos; *mundo 2*, de las disposiciones, expectativas y procesos mentales y *mundo 3*, de los contenidos objetivos de pensamiento científico, artístico o de otra índole, que se encuentra en el contenido de libros, bibliotecas, museos, computadoras y repositorios digitales. Este último es autónomo, en cierto sentido, puesto que las relaciones lógicas implícitas en él se pueden descubrir, de la misma manera que en el *mundo 1* se hacen descubrimientos geográficos o se encuentran nuevas especies de insectos.

El fundador del *racionalismo crítico* admite el conocimiento en dos sentidos, el subjetivo y el objetivo. El primero es un estado mental, una disposición para comportarse o para reaccionar. Mientras que el segundo consiste en problemas, teorías y argumentos que son independientes de las creencias, las disposiciones a actuar o las pretensiones de conocimiento de los sujetos. Se trata de un conocimiento objetivo sin sujeto cognoscente. Conviene agregar que la conciencia plena de sí mismo, que tienen los sujetos, así como el inicio y desarrollo del *mundo 3* se genera en el lenguaje humano. Por esa razón la mayor parte del conocimiento subjetivo, inherente al *mundo 2*, depende del contenido de los repositorios que tiene el *mundo 3*.²

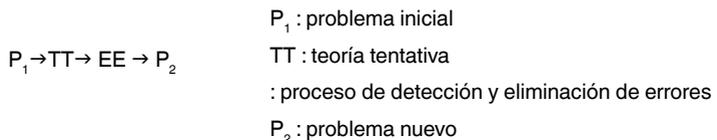
Dicho de otra manera, los problemas y relaciones entre objetos que se hacen conscientes en los procesos mentales ya existían en forma potencial en el mundo del conocimiento objetivo. Así, por ejemplo, la conjetura que dice "Todo número par mayor que 2 puede escribirse como suma de dos números

2) POPPER, Karl, *Conocimiento Objetivo*, Madrid, Tecnos, 1982, pp. 76-77, 107-108.

primos" estaba potencialmente en el *mundo 3*, pero pasó al *mundo 2*, cuando Christian Goldbach la formuló en 1742. Se trata por lo general de relaciones posibles entre objetos creados por el hombre.³

De la misma manera, la teoría de la *incertidumbre* en metrología, objeto de este trabajo, residía potencialmente en el mundo 3 hasta que la *concepción tradicional* no pudo enfrentar los problemas de trazabilidad que impuso la globalización de los mercados y se buscó una solución para ello. Para evaluar esas dos teorías se examinan las condiciones de aproximación a la verdad e se evalúa su efecto en ámbitos donde se mide.

El *racionalismo crítico* sostiene que los problemas nuevos llevan a construcciones que generan nuevos hechos, problemas inesperados o incluso nuevas refutaciones. Es más, los problemas emergentes estimulan nuevas creaciones, siguiendo así un proceso recursivo descrito en el siguiente esquema simplificado:



Dicho de otro modo, se parte de algún problema (P_1), se formula una teoría tentativa (TT), que puede ser errónea y por ello sujeta a un proceso de detección y eliminación de errores (EE), que consiste en una discusión crítica o en pruebas experimentales. En cualquier caso, surgen nuevos problemas (P_2). A propósito, los problemas nuevos no son intencionales, sino que surgen autónomamente de las relaciones que se establecen con cada nueva acción.

En otras palabras, el esquema se basa en la idea reguladora de búsqueda de la verdad que emplea la crítica consciente para detectar y eliminar errores. De ese modo los nuevos problemas surgen cuando la crítica detecta contradicciones e intenta eliminar los errores. En efecto, este proceso facilita el desarrollo del conocimiento, conduce a una mayor verosimilitud y así posibilita una mayor aproximación a la verdad objetiva. El mundo del conocimiento objetivo es autónomo y se retroalimenta con los mundos de los estados mentales y de los objetos físicos, produciendo el aumento del conocimiento.⁴⁵

3) POPPER, Karl, *Conocimiento...* p. 116.

4) POPPER, Karl, *Popper. Escritos Selectos*, Miller, David (Comp.), México D.F., Fondo de Cultura Económica, (1995), pp. 73-81.

5) POPPER, Karl, *Conocimiento...* p. 117.

Hay que destacar que Karl Bühler desarrolló la doctrina de las tres funciones del lenguaje: a) la *expresiva* o *emotiva*, que expresa sentimientos del emisor del mensaje; b) la *conativa* o *apelativa*, que influye en el receptor, mediante órdenes, mandatos o sugerencias y, c) la *descriptiva* o *referencial*, usada para transmitir información sobre cierta realidad de manera objetiva. Popper, discípulo de Bühler, adhirió a su doctrina y le agregó la función *argumentativa*, admitiendo la existencia de otras más. Una argumentación consiste en proporcionar las razones para sostener cierta posición, por ejemplo, señalando las dificultades o las contradicciones de otra posición. Las cuatro funciones referidas están jerarquizadas en inferiores, *expresiva* y *conativa*, y en superiores, *descriptiva* y *argumentativa*. Las funciones inferiores pueden presentarse sin las superiores, pero estas últimas requieren de las inferiores.⁶

Popper sostiene que los efectos más importantes de retroalimentación en el cerebro humano son producidos por las funciones superiores del lenguaje, *descriptiva* y *argumentativa*. La primera está regulada por la *verdad*, entendida ésta como la propiedad de una descripción que se apega a los hechos. En cambio, la función argumentativa presupone la descriptiva, dado que los argumentos se usan para criticar las descripciones desde el punto de vista de la verdad. Conviene señalar que existen otras ideas reguladoras como: *contenido*, *contenido de verdad* y *veracidad*.

En relación con la *verdad*, Popper adhirió a la teoría de Tarski, que permitía solucionar el problema de las antinomias y paradojas, que debilitaban la teoría de la verdad objetiva como correspondencia con los hechos. Cabe aclarar que Tarski empleó esa teoría para lenguajes formalizados, pero Popper sostenía que también era aplicable a los lenguajes naturales, si se evitan las inconsistencias, introduciendo ciertas advertencias para su uso.⁷

En lo que se refiere a las teorías científicas, Popper sostenía que éstas correspondían al conocimiento conjetural y hacía la salvedad de que algunas conjeturas son preferibles a otras. De este modo el autor se apartó del escepticismo radical, admitiendo que el conocimiento conjetural puede mejorar y crecer. Cabe observar que la preferencia de ciertas teorías en detrimento de otras es un proceso racional. Por ese motivo indicó que hay que aclarar perfectamente los principios de selección, que deben regirse por la idea de verdad, para eliminar las teorías falsas y retener las verdaderas. Es más, lo que se busca descubrir es una verdad novedosa e interesante, que incremente los contenidos informativos.

6) POPPER, Karl, *Conjeturas y refutaciones*, Barcelona, Paidós, 1991, p. 357.

7) POPPER, Karl, *Popper. Escritos...* p. 198.

Popper sostenía que una teoría con mucho contenido informativo era más interesante que una que propone trivialidades o tautologías, incluso antes haberla puesto a prueba. Otro punto es que una teoría que proporciona mucha información se desecha si no supera el peso de las pruebas; pero aun así, los intentos por encontrar sus falsedades podrían revelar hechos nuevos o problemas inesperados. De este modo surge la siguiente regla metodológica: elegir las teorías más osadas, con mucha información y luego, ponerlas a competir entre sí, utilizando discusiones críticas y pruebas rigurosas.

Supuesto que el contenido y el contenido de verdad de una teoría T_i son mensurables, el *racionalismo crítico* propone medir la verosimilitud del siguiente modo:

$Vs(T_i)$: verosimilitud o veracidad

$$Vs(T_i) = CtV(T_i) - CtF(T_i) \quad (2) \quad CtV(T_i): \text{medidas del contenido de verdad}$$

$CtF(T_i)$: medidas del contenido de falsedad

Es obvio que la veracidad aumenta si el contenido de verdad crece y el de falsedad no, o cuando el contenido de falsedad disminuye y el de verdad no se incrementa. De este modo es posible evaluar conceptualmente la verosimilitud de dos teorías.

En efecto, sea por ejemplo la teoría de Newton (T_1), es una buena aproximación a la verdad, por la gran cantidad de consecuencias verdaderas interesantes e informativas que contiene, pero la de Einstein (T_2) tiene más aun. De este manera, dadas dos teoría T_1 y T_2 , la segunda tiene más verosimilitud que la primera si, y sólo si, de T_2 se deducen más enunciados verdaderos que de T_1 , pero no más enunciados falsos o igual cantidad de enunciados verdaderos y menos enunciados falsos.⁸

En el caso de este trabajo se evalúan dos teorías de la medición, la tradicional de errores (T_1) y la de *incertidumbre* (T_2). En la primera se utiliza extensivamente el término '*valor verdadero*', que se corresponde con el concepto de '*valor más probable*'. Esta diferencia entre lo que el término insinúa y el concepto que realmente tiene no era significativa cuando en las mediciones

8) POPPER, Karl, *La logica delle scienze sociali e altri saggi*, Roma, Armando Editore, 2005, pp. 34-37. POPPER, Karl, *Conocimiento objetivo*. Madrid, Tecnos, (1982), pp. 53-60. POPPER, Karl, *Popper. Escritos...*, pp. 125-126.

no se ponían en juego grandes precisiones y además, quedaban circunscriptas a niveles locales, desde el punto de vista geográfico. Pero dejó de serlo con el advenimiento de la globalización de los mercados que exige instrumentos y procedimientos contrastables en todo el mundo. Así por ejemplo, si se mide cierta propiedad del mosto concentrado en Mendoza, este valor debe replicarse cuando se lo mensura en Japón.

3. Medición y metrología

La medición vincula las teorías empíricas con la realidad, y la metrología utiliza fundamentos científicos para realizar las mediciones. Se trata de un ámbito teórico que se ha vuelto indispensable para la ciencia y la tecnología por la cantidad de aplicaciones que tiene.⁹ Por cierto, en una medición se forma un sistema en el que se interrelacionan siempre: a) lo que se mide, llamado '*mensurando*'; b) lo que mide, denominado '*instrumento*' y c) el que mide, conocido como '*operador*'. Este último puede ser una persona o un dispositivo automático. Además, en la acción de medir se compara lo que se quiere medir (*mensurando*) con una cantidad de referencia de la misma clase que se adopta como unidad. Cabe aclarar que la referencia puede ser una unidad de medida, un procedimiento de medida, un material de referencia o una combinación de ellos.¹⁰

Asimismo, este proceso puede hacerse de dos maneras: i) plasmando el valor de la magnitud medida con la intervención directa de patrones o materiales de referencia; ii) aplicando un instrumento de medida sobre el mensurando, denominado '*método directo*'. Ambas opciones son similares, ya que en la segunda el instrumento de medición, que actúa sobre el mensurando, también debe contrastarse con patrones o materiales de referencia. Hay que destacar que la comparación se realiza sobre la escala del instrumento calibrada con patrones o materiales de referencia. Esta acción debe repetirse periódicamente para mantener la calibración en el tiempo.

Otro aspecto a tener en cuenta son las condiciones que hacen posible una medición. En primer lugar, hay que considerar que el mensurando es una magnitud, esto es la propiedad de un objeto, que puede darse en distinto grado. Éste es cualquier ente abstracto para el cual existe un criterio que permite definir su igualdad y su suma. Así por ejemplo, si la longitud es un ente abstracto

9) SANCHEZ PERZ, A. M. y CARRO, J., "Consideraciones sobre los errores de medida" en *Novamáquina* (2000), 62, pp. 16-20.

10) *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2012, p. 15.

y existe alguna forma para decidir cuando ésta es suma de otras dos y cuando dos longitudes son iguales, entonces ese mensurando es una magnitud.

En definitiva, medir es asignar un número a una magnitud, por ello ésta última debe poseer algunas de las cualidades que poseen los números: origen, orden y distancia. En los números, el origen es el cero, el orden es la propiedad que comparten naturales, racionales y reales y, la distancia entre dos de ellos es su diferencia. Conviene destacar que el proceso de medir una magnitud culmina con la obtención de un número llamado '*medida*'. En consecuencia, una medición establece: a) una correspondencia biunívoca entre la magnitud y los números; b) que si una magnitud es mayor que otra, le corresponde un número mayor; y c) que el cero significa la ausencia de la propiedad considerada.

En segundo lugar, hay que tener en cuenta que el número o medida de la propiedad considerada se obtiene con las técnicas de medición. Éstas involucran tanto al instrumento de medida como al operador del mismo. El aparato debe ser válido para medir lo que se pretende y además debe ser confiable para que mida con exactitud, mientras que el operador debe conocer y dominar la técnica de medición. Cabe aclarar que la *validez* es el grado con que el instrumento sirve a su propósito cualitativo y cuantitativo, así por ejemplo, una regla mide longitudes y no temperaturas y además, un termómetro clínico no sirve para medir las temperaturas de un horno industrial. Por otra parte en lo que concierne a la *confiabilidad* es la exactitud con que mide el instrumento, se trata de la capacidad de repetir la misma medida cuando se lo aplica a la misma propiedad más de una vez. A veces existen fluctuaciones al repetir una medición, entonces la confiabilidad aumenta cuando disminuyen las diferencias entre las medidas obtenidas. La confiabilidad asegura que lo que se mide está bien medido.¹¹

Ahora bien, el sistema *mensurando-instrumento-operador* está sometido a la influencia del medio ambiente, lo que puede introducir nuevas variables. Si ese fuera el caso, éstas últimas deben de tenerse en cuenta para garantizar la calidad metrológica de la medida. Así por ejemplo, sea el caso de medir por comparación una masa de acero de 1 Kg., en una balanza, utilizando una masa patrón de 1 Kg. y la diferencia de densidades entre las masas es del orden del 10 %. Cuando se decide expresar el resultado en el orden del gramo no es preciso considerar el empuje del aire, pero si se lo expresa en el orden del miligramo habrá que considerar dicho empuje.

11) MARONE, Víctor J., CUADRADO Lorenzo S., *Evaluación de los conocimientos de Física mediante pruebas objetivas*, Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, 1971, pp.3-7.

En resumen, para que el proceso de medición sea confiable, el mensurando y el método de medición deben especificarse adecuadamente. Además, los instrumentos de medición deben funcionar correctamente, asegurando que su especificación técnica está bien correlacionada con los patrones. Por último, hay que considerar si se tienen en cuenta o no los factores ambientales. Sucintamente dicho, se trata de un proceso para obtener una descripción veraz del mensurando, con el mayor contenido posible de verdad y el menor de falsedad.

4. Trazabilidad

La *trazabilidad*, según la RAE, es la posibilidad de identificar el origen y las diferentes etapas de un proceso de producción y distribución de bienes de consumo, así como el reflejo documental de estas etapas. En tanto que el Vocabulario de Metrología Internacional (V.I.M.) define la '*trazabilidad*' como la "propiedad del resultado de una medición mediante la cual el resultado se puede relacionar a una referencia a través de una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, donde cada una contribuye a la *incertidumbre* de medición"^{12, 13} En efecto, la referencia puede ser una unidad de medida a través de su realización práctica o un procedimiento de medición que incluye la unidad de medida para una magnitud no ordinal, o un patrón de medición^{14, 15}.

La cadena de comparaciones garantiza que los resultados obtenidos se corresponden con la realidad de una referencia. Por lo general, la diferencia entre el aparato de medición y la referencia debe ser irrelevante en cada etapa del método. En ese sentido, la comprobación de la *trazabilidad* permite asegurar resultados semejantes a los obtenidos por otros laboratorios. En definitiva, la depositaria de la verdad, como criterio regulador, para cada medición es la *trazabilidad*.

Hecha la observación anterior, cabe decir que a las mercaderías, productos y aparatos de medición se les colocan etiquetas con códigos QR (*quick response code*), una mejora de los códigos de barra, que los vincula con su trazabilidad. De este modo, esos objetos se vuelven auto referenciales, dado que con un lector de códigos QR se puede recuperar su trazabilidad fácilmente, porque

12) *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2008, p. 36.

13) Hall B.D. y Willink R., "Does "Welch-Satterthwaite" make a good uncertainty estimate?" en *Metrologia*, (2001), 38, pp.9-15.

14) EURACHEM/CITAC, *Quantifying uncertainty in analytical measurement*, EURACHEM/CITAC Guide, 2^o Edition (2000).

15) ISO/TS 21748:2004 *Measurement uncertainty for metrological applications*.

almacenan mucha información. Su uso está cada vez más difundido, porque suele ser una de las exigencias que impone la globalización de los mercados.

5. Valor verdadero, exactitud y precisión

De acuerdo con el V.I.M. el *valor verdadero de una magnitud* es el “valor compatible con la definición de una magnitud particular dada”¹⁶ y se obtendría mediante una medición perfecta, que por su misma naturaleza queda sin determinar. En ese sentido, P. Duhem advirtió que los principios matemáticos de una teoría operan dentro de un sistema ideal, que no indica el grado de tolerancia que se les debe otorgar en su realización experimental¹⁷. Dicho de otro modo, tanto el *valor verdadero* del mensurando como el *error de medición* son conceptos ideales y por ese motivo, no tienen una correspondencia cierta con la realidad.¹⁸ En efecto, cada medición tiene imperfecciones, algunas aleatorias, otras por efectos sistemáticos y todas ellas, en conjunto, alimentan la *incertidumbre* del resultado.¹⁹

Por otra parte, para el V.I.M., la *exactitud* es “la proximidad de concordancia entre valores medidos de una magnitud que son atribuidos al mensurando”.²⁰ Esto significa que una medida es más exacta cuando tiene una *incertidumbre* más pequeña, se trata de la pertenencia a un intervalo y no de un valor numérico determinado. En términos estadísticos, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. La especificación de la *exactitud* depende de la *veracidad* y la *precisión*. En un sentido general, la *veracidad* es una propiedad de los actos de cognición que tienden a formar proposiciones verdaderas, que expresan lo que ocurre, de acuerdo con la teoría de la verdad como correspondencia²¹. En tanto que para el V.I.M., ‘*veracidad*’ es “la proximidad de concordancia entre el promedio de un número infinito de valores medidos replicados y un valor de referencia”.²² La veracidad de una medida es inversamente proporcional al error sistemático, pero no se relaciona con los errores aleatorios y no puede expresarse numéricamente.

16) *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2008, p. 28.

17) DUHEM, Pierre, *La Théorie physique. Son objet et sa structure*. Paris, Chevalier & Rivière, 1906, pp. 274-276.

18) MONTGOMERY, Douglas C., *Design and Analysis of Experiments*, 5th Ed, New York, John Wiley, 1997. Pp. 152-155.

19) EURACHEM/CITAC, *Quantifying uncertainty in analytical measurement*, EURACHEM/CITAC Guide, 2° Edition (2000).

20) *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2008, p. 29.

21) RUNES, Dagobert, *Diccionario de Filosofía*, Barcelona, Grijalbo, 1985, p. 381.

22) *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2008, p. 29.

Para continuar, *precisión* indica la proximidad de concordancia entre valores medidos obtenidos por mediciones repetidas de un mismo objeto bajo condiciones especificadas. Se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. La *precisión* aumenta si la dispersión disminuye. Por ello está regulada por la *validez* y la *confiabilidad*. La *precisión* sí se expresa en forma numérica y evalúa los efectos aleatorios de una medición con el rango, la varianza y la desviación estándar.

Desde un punto de vista práctico, se dice que una medición es veraz si se la contrasta con referencias.²³ En efecto, un resultado es veraz cuando tiene *trazabilidad* con la referencia utilizada y a su vez, ésta también es trazable.²⁴ Para evaluar si la veracidad está controlada se realiza un cálculo estadístico que tiene en cuenta el sesgo, determinando que los errores sistemáticos estén controlados, caso contrario debe revisarse todo el proceso de medición.

Cabe añadir que un resultado es exacto si es veraz y preciso. La veracidad indica que se conoce el sesgo o alejamiento de la medición hacia un lado, y que la *incertidumbre* está controlada. En tanto que la *precisión* revela que los efectos aleatorios están dentro de las tolerancias del método. Existen procedimientos estadísticos que determinan muy bien el control de la *precisión*. Cuando eso ocurre en una organización, se puede afirmar que la *precisión* que ha logrado en sus prácticas de medición no tiene diferencias estadísticamente significativas con la *precisión* basada en patrones.

La *precisión* puede ponderarse usando diversos test estadísticos, que miden la varianza o la dispersión de los resultados y los comparan con otros datos de variabilidad provenientes de referencias bibliográficas muy confiables. También pueden usarse las cartas de control estadístico para este fin. De todos modos es indispensable saber como fueron realizados los ensayos, para conocer cómo se calculó la variabilidad del método. En ese sentido hay que precisar en qué condiciones se hicieron las experiencias, si fueron las mismas para todas o si éstas cambiaron en parte o en su totalidad. Este último aspecto es el que determina la diferencia entre repetibilidad y reproducibilidad.²⁵

23) NC ISO/IEC Guía 43-1: 2000, *Ensayos de aptitud por comparación Interlaboratorio - Parte 1: Desarrollo y Funcionamiento de Programas de Ensayos de Aptitud*. 2000.

24) International Organization for Standardization, *Statistics, Vocabulary and symbols*, ISO 3534-1, ISO, Geneva, 1993.

25) RIU, J. y RIUS, F. X., "Univariate regression models with errors in both axes" en *Journal of Chemometrics* (1995), 9, pp. 343-362.

6. Determinación del sesgo del sistema de medición

Para determinar el sesgo de un sistema de medición se realiza la experiencia de medir con un método normalizado, en condiciones de repetibilidad. Luego, la organización debe efectuar comprobaciones periódicas de estabilidad. En primer lugar se comprueba la *precisión* del método de medición normalizado, comparándolo con la desviación estándar de las mediciones realizadas en la organización y luego, se evalúa la veracidad. La desviación estándar en las mediciones de la organización se calcula usando la media de los resultados de los ensayos.

7. Incertidumbre de una medición

La calidad del resultado de una medición debe expresarse cuantitativamente de manera segura y confiable, de manera que satisfaga las necesidades del usuario.²⁶ Esta condición hace comparables los resultados de las mediciones entre ellos o respecto a valores de referencia dados por una especificación o un patrón. De ese modo se asegura el criterio regular de verdad como correspondencia con la realidad.

Cabe observar que la *concepción tradicional* o del *valor verdadero* utilizaba en forma asidua términos como '*error*' y '*análisis del error*', para atender el aspecto pragmático de la metrología. La medición focalizada en el *error* consiste en estimar un valor tan próximo como sea posible a un valor verdadero único que es ideal. La desviación del valor estimado respecto del valor verdadero está constituida por errores sistemáticos y aleatorios, admitiendo que es posible distinguirlos para tratarlos de manera distinta. Sin embargo, no existe una regla que indique cómo combinarlos en el error total de la medida resultante, por ese motivo sólo se obtiene un valor estimado. En general, solo es posible estimar un límite superior del valor absoluto del error total denominado a veces de modo inapropiado '*incertidumbre*'.

En cambio la *concepción basada en la incertidumbre* es bastante nueva en esta disciplina y ha obligado a reconsiderar ciertos conceptos. Su objetivo no es determinar el mejor valor verdadero posible, sino que atribuye al mensurando un intervalo de valores razonables obtenidos de la medición, suponiendo que ésta se realizó correctamente. La incorporación de información adicional pertinente puede reducir ese intervalo. Sin embargo, por refinada que sea una

26) EA-4/02 *Expresión de la Incertidumbre de Medición en Calibración*, 1997, pp. 20-22.

medición no es posible reducirla a un único valor, a causa de la cantidad de detalles que intervienen en la definición del mensurando. Esto conduce a que la definición del mensurando tiene una *incertidumbre* intrínseca, que impone un límite inferior a toda *incertidumbre* de medida. En ese mismo sentido, se denomina 'valor medido' a un valor elegido para representar el intervalo señalado.^{27 28}

Hay que destacar, de acuerdo con el proceso propuesto por el *racionalismo crítico*, que el problema de calcular el error verdadero con una medida idealizada (P_1), llevó a formular una teoría tentativa, la de *incertidumbre* (TT), que actualmente está sorteando bastante bien el proceso de detección y eliminación de errores (EE) y que ha generado un nuevo problema (P_2), el de la trazabilidad de los instrumentos de medición. Una consecuencia tecnológica de este nuevo problema es la aparición laboratorios y centros que certifican esa trazabilidad, para garantizar la verdad como criterio regulador.

Actualmente se considera que existe un componente de *incertidumbre* en el resultado de una medición.²⁹ Esto se acepta así, aun habiendo evaluado y ajustado correctamente todas las componentes conocidas o supuestas de un error y además, admitiendo que se hubiesen aplicado las correcciones adecuadas. Por este motivo es válido preguntar: ¿Cuan correcto es el resultado de una medición para que represente el valor de la magnitud que se está midiendo?

Desde 1960 el Sistema Internacional de Medidas (S.I.M.) brinda uniformidad y coherencia a todas las mediciones científicas y tecnológicas. Pero en la actualidad se requiere algo más. Por un lado, el desarrollo tecnológico ha producido una gran cantidad de aparatos de medición para las aplicaciones más diversas y que exigen calibraciones periódicas. Por otra parte, la globalización de los mercados, en simbiosis con el problema anterior, ha generado la necesidad de contar con mediciones que sean contrastables en cualquier parte del mundo. En consecuencia es lógico que se desarrolle un método confiable, que permita evaluar la *incertidumbre* de las mediciones, haciéndolas fácilmente comparables y uniformes en todo el mundo.

Puede decirse que la *incertidumbre* es un parámetro no negativo asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que

27) *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2012, pp. 9 y 10.

28) ISO/TS 21748:2004 Measurement uncertainty for metrological applications.

29) BARNARD, G. A., "Control Charts and Stochastic Processes" en *Journal of the Royal Statistical Society* 1999, 21, pp. 34-37.

podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando.³⁰ Hay que destacar que la *incertidumbre* de una medida proviene de efectos sistemáticos, como los componentes asociados a las correcciones y los valores asignados de patrones de medida, pero conviene tener en cuenta que también interviene la *incertidumbre* intrínseca, de medida mínima, que es inherente al nivel de detalle con el que se define al mensurando.

8. Funcionamiento de un aparato de medición y control de la deriva instrumental

En cualquier laboratorio de ensayo y calibración o de procesos industriales, el uso de un sistema de medición requiere que tanto los equipos, así como la destreza del personal que los opera, sean los adecuados. Conviene destacar que la metodología *seis sigmas*, empleada en la mejora de procesos, reduce los defectos de productos y servicios considerablemente. Lo consigue estableciendo que las decisiones se tomen en base a datos ciertos y evitando cualquier suposición. Para ello necesariamente hay que medir todas las características que el cliente considera relevantes. Se trata de un proceso que genera una variable aleatoria, cuyas variaciones se originan en errores de medición producidos por defectos de las partes o las muestras o que provienen de los instrumentos de medición.^{31 32}

La calibración es una operación básica que se aplica a los aparato de laboratorio o de uso industrial para establecer la trazabilidad de los instrumentos de medición, razón por la que debe realizarse periódicamente. Además, la calibración se debe complementar con la información relativa a las condiciones de uso del instrumento que oficia de patrón, para poder asignar la *incertidumbre* final a los resultados. En definitiva, sin calibración no se puede asegurar la *trazabilidad* y en consecuencia los valores que proporcionan los instrumentos no garantizan ninguna precisión.

En un primer paso, si se respetan determinadas condiciones, la calibración relaciona los valores de la magnitud con las *incertidumbres* de medición, que provienen de patrones con *incertidumbres* asociadas. En un segundo paso, utiliza esa información para obtener un resultado de medición a partir del valor

30) *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2008, p. 32.

31) FERNÁNDEZ DE AGUIRRE GUANTES, Ignacio, "Aula Dyna: ¿Qué fue de seis sigma?" en *Dyna* (2010), 85-9, p. 720-723.

32) TORRES NAVARRO, Carlos y MONSALVE OCHOA, Oscar A., "Aplicación de metodología seis sigma para disminuir intervenciones en proceso de fabricación de vidrios" en *Revista Ingeniería Industrial*, Concepción, Chile, (2009-1), pp. 93-105.

que entrega el instrumento, llamado también '*indicación*', de acuerdo con el Vocabulario Internacional de Metrología, 2012.

El objetivo de calibrar un instrumento (calibrando) es establecer las diferencias que puedan presentarse entre él y un elemento de referencia, con características metrológicas estables y conocidas suficientemente. Conviene observar que el valor entregado por el instrumento, no necesariamente se corresponde con el valor verdadero de la magnitud medida (mensurando), ya que una medición bruta, realizada con cualquier instrumento pueden tener alguna deriva instrumental, que lo aleja del valor más probable.

Por esa razón existe la necesidad periódica de contrastar cada instrumento de medición con patrones estables y de *incertidumbre* conocida. Si el instrumento no entrega valores correctos, es necesario corregir los valores medidos. Sin embargo, las correcciones introducidas no se pueden asegurar con exactitud, generando *incertidumbre* en los resultados finales.

La calibración permite obtener el factor de corrección que se aplica a los valores proporcionados por el instrumento, y también al cálculo de la *incertidumbre*. Para que esa operación sea confiable es necesario maniobrar el instrumento, durante la calibración, de la misma manera que se usa en una medición corriente.

La *deriva instrumental* es la variación continua o incremental en el tiempo de una indicación, producida por cambios en las propiedades metrológicas del instrumento de medición.³³ Cuando estos últimos sufren una deriva, los valores que entregan se alejan de los estándares correctos, aun con calibraciones periódicas. Este proceso se puede atenuar determinando el tiempo entre calibraciones con más precisión, para eliminar posibles mediciones incorrectas. Cabe agregar que los operadores y analistas también deben ser controlados para conocer el grado de precisión de sus mediciones.

Por su parte, un sistema de confirmación metrológica tiene el propósito de reducir al máximo los errores en los instrumentos de medición. Eso se consigue cuidando que el equipo de medición mantenga sus errores dentro de las tolerancias admitidas. También se busca determinar la capacitación de los operadores y analistas que realizan el proceso de medición, para saber si todos trabajan con la misma precisión. Esos objetivos se pueden lograr con herramientas estadísticas adecuadas que permitan verificar los procesos correctamente.

33) *Vocabulario Internacional de Metrología*, 2012, pp. 50 y 51.

En igual forma, las verificaciones internas son muy útiles, pero deben realizarse respetando las condiciones y los patrones adecuados. Conviene indicar que si bien el uso de patrones de verificación no sustituye ni la calibración ni las confirmaciones regulares de los instrumentos, puede prevenir que se usen equipos que dejaron de cumplir con las especificaciones.

Para controlar los aparatos de medición conviene utilizar cartas de control estadístico diariamente. La más recomendada para ese objetivo es la carta del promedio móvil ponderado exponencialmente (EWMA), debido a que detecta pequeños corrimientos de la media, esto es menos de una vez y media *sigma*, aproximadamente. Estas cartas advierten con antelación cuando un aparato de medición puede salirse de control, para comenzar a trabajar fuera de la tolerancia permitida. Por esta razón, su uso correcto en procesos de medición permite alcanzar la situación denominada 'cero defecto'. Desde luego, es posible aplicar otros criterios en este tipo de cartas, como las pruebas para corridas y el uso de límites de advertencia, sin embargo estas técnicas son más complejas de interpretar.

9. Resultados

Los autores de este trabajo, siguiendo las pautas del *racionalismo crítico*, evalúan que no existe todavía un método universal de medición aceptado totalmente, como conocimiento de fondo. Sin embargo la preferencia creciente por la teoría de la *incertidumbre* parece imponerse, desplazando a la teoría tradicional de errores. Tendencia que se explica cuando se tiene en cuenta la calidad metrológica de la medida. Está claro que el método de *incertidumbre* define mejor tanto el mensurando como las condiciones de medición y por ello es más confiable. Sin duda se trata de una modificación de la teoría, para dotarla de mayor nitidez en el problema de medir.

En efecto, el intento de calcular el error verdadero con la medida idealizada del valor verdadero llevó a formular la teoría de *incertidumbre*. Se trata de una tentativa, que viene superando bastante bien el proceso de detección y eliminación de errores. Cabe aclarar que se trata de un proceso de medición más complejo y por ese motivo ha generado un nuevo problema: la determinación de la *trazabilidad* de los instrumentos de medición.

La aparición laboratorios y centros de certificación de la *trazabilidad*, para garantizar la verdad como criterio regulador, es una de las consecuencias tecnológicas de este nuevo problema. La *trazabilidad* documenta la cadena de

calibraciones sucesivas de los instrumentos de medición. También resuelve el problema del valor verdadero de una magnitud que permanece desconocido siempre, incorporando la *exactitud* como una función de la *precisión* y la *veracidad*, y esta última de la *trazabilidad*.

10. Conclusiones

La teoría metodológica del *racionalismo crítico* proporciona los elementos para evaluar y comprender el cambio teórico que se está produciendo en la teoría de las mediciones.

La globalización de los mercados, consecuencia directa de los avances científicos y tecnológicos, está generando nuevas demandas a la metrología. Entre ellas se destaca la búsqueda de un método uniforme, que permita comparar fácilmente mediciones realizadas en diferentes partes del mundo.

La teoría de la *incertidumbre* de medición parece ser, a juicio de los autores, la respuesta a esa búsqueda, reemplazando a la concepción tradicional en las publicaciones específicas del tema. Este proceso se adecua muy bien a la teoría metodológica del *racionalismo crítico*.

La concepción tradicional utiliza el valor verdadero de una magnitud que siempre es desconocido. En cambio, la teoría de la *incertidumbre* ubica el valor en un intervalo. Desde un punto de vista práctico eso se manifiesta en la *exactitud*, que asegura cierta cantidad de decimales en el valor medido, que representa el intervalo indicado. Para ello se documentan las calibraciones sucesivas de los instrumentos de medición usando la *trazabilidad* que incide en la *exactitud*, proceso regulado por el criterio de verdad, como correspondencia con la realidad.

Las relaciones comerciales entre países exigen que los valores de medición no presenten diferencias estadísticamente significativas, cuando el mismo mensurando se mide en diferentes partes del planeta. Este criterio puede asegurarse solamente si se acepta la verdad como el criterio que regula la correspondencia de una descripción con la realidad.

Es recomendable asegurar los procedimientos periódicos de calibración del instrumental tecnológico de alta complejidad, como analizadores bioquímicos, tomógrafos, ecógrafos entre otros, para que estos mantengan su validez y confiabilidad.

La satisfacción de clientes internos y externos, depende de la calidad de

las mediciones y la teoría de la *incertidumbre* puede asegurarla eficazmente.

Las repercusión de este trabajo se da a diferentes niveles, los comerciales y tecnológicos ya mencionados, pero también son académico-científicos.

Los autores evalúan que trabajar en la línea del análisis epistemológico de las teorías científicas, les ha permitido detectar el conflicto planteado en la presente investigación.

Julio Ortigala es Ingeniero Químico y Magister en Ingeniería en Calidad por la Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional. En la misma institución es Profesor Titular de Control Estadístico de Procesos de la carrera Ingeniería Química y Profesor de Calidad en las mediciones en la maestría de Ingeniería en Calidad. Es docente-investigador del Programa de Incentivos y director de proyectos homologados. Su área de interés se relaciona con el Aseguramiento de la calidad en las mediciones físicas y químicas y con la Teoría de la incertidumbre en las mediciones.

Guillermo Cuadrado es Ingeniero en dos especialidades, Petróleos e Industrial, ambas por la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. También es Especialista en Docencia Universitaria, por la misma Universidad. Tiene un posgrado en Economía y Administración de la Scuola Superiore "Enrico Mattei" del Ente Nazionale Idrocarburi (E.N.I.), Milán, Italia. Es Profesor Titular de Seminario de Fundamentos Filosóficos de las Ciencias Físico-Matemáticas de la carrera de Filosofía y de Matemática y Estadística de la carrera de Geografía, ambas en la Facultad de Filosofía y Letras, UNCuyo. En la Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional es Profesor Titular de Análisis Matemático I. Es docente investigador del Programa de Incentivos y director de proyectos homologados. Su área de interés se ubica en una línea de investigación relacionada con la concepción representacional de la ciencia y se orienta a optimizar los estudios universitarios.

Recibido: 25 de mayo de 2014

Aprobado para su publicación: 30 de julio de 2014