



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES  
ORGANISMO DE INVESTIGACION JUDICIAL (OIJ)  
PODER JUDICIAL, COSTA RICA

**ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS  
ANÁLISIS FORENSES**

PROCEDIMIENTO DE  
OPERACIÓN NORMADO  
ESPECIFICO

**P-DCF-ECT-JEF-06**

VERSION: 06

Rige desde: 30/06/2022

PAGINA: 1 de 103

**Elaborado o modificado por:**

**Visto Bueno Gestión de Calidad:**

**Lic. Ronald Alberto Castro Esquivel**  
Perito Judicial 2, Técnico en Metrología  
Sección de Química Analítica

**Máster Daniel Gerardo Gómez Murillo**  
Asegurador de la Calidad, UGC

**Aprobado por:**

**M.B.A. Mauricio Chacón Hernández**  
Jefe, Departamento de Ciencias Forenses

**CONTROL DE CAMBIOS A LA DOCUMENTACIÓN**

<b>Versión</b>	<b>Fecha de Aprobación</b>	<b>Fecha de Revisión</b>	<b>Descripción del Cambio</b>	<b>SCD</b>	<b>Solicitado por</b>
01	26/10/2011	01/03/2017	Versión Inicial del Procedimiento	-	MSZ
02	01/03/2017	29/06/2018	Se cambia formato, actualización del contenido, correcciones varias y ampliación del método numérico	31-16	MCH
03	29/06/2018	08/05/2019	Modificación del nombre de formulario condiciones temperatura	19-18	MCH
04	08/05/2019	14/07/2020	Se incluyen aspectos de la Norma ISO/IEC 17025:2017 y del AR 3125 de la Norma ISO/IEC 17025:2017 del Organismo Acreditador	18-19	MCH
05	14/07/2020	30/06/2022	Se hace referencia a nuevas emisiones del documento AR 3120 de ANAB (2019/07/03 y 2020/06/15) y aspectos de observaciones recibidas.	14-20	MCH



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES  
ORGANISMO DE INVESTIGACION JUDICIAL (OIJ)  
PODER JUDICIAL, COSTA RICA

**ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS  
ANÁLISIS FORENSES**

PROCEDIMIENTO DE  
OPERACIÓN NORMADO  
ESPECIFICO

**P-DCF-ECT-JEF-06**

VERSION: 06

Rige desde: 30/06/2022

PAGINA: 2 de 103

06	30/06/2022		Se incluyen cambios producto de la revisión periódica del Sistema de Gestión de Calidad y Auditoría Interna 2022. Se realiza aclaración con respecto a los puntos 7.1.3.6.1 y 7.1.3.6.2 del AR 3120 y se incluye la opción del uso del método de Monte Carlo. Versión revisada en reunión de Comisión de Calidad 07-2022.	16-22	MCH
----	------------	--	---	-------	-----

**ESTE PROCEDIMIENTO ES UN DOCUMENTO CONFIDENCIAL  
PARA USO INTERNO DEL DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES  
SE PROHÍBE CUALQUIER REPRODUCCIÓN QUE NO SEA PARA ESTE FIN**

**La versión oficial digital es la que se mantiene en la ubicación que la Unidad de Gestión de Calidad defina. La versión oficial impresa es la que se encuentra en la Unidad de Gestión de Calidad. Cualquier otro documento impreso o digital será considerado como copia no controlada**

COPIA NO CONTROLADA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 3 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

### 1 Objetivo:

Establecer de forma general cuando apliquen, los diferentes métodos y sus pasos, para realizar la estimación de la incertidumbre de los diferentes resultados de los métodos de análisis empleados en las pericias de las Secciones del Departamento de Ciencias Forenses (DCF).

### 2 Alcance:

Este procedimiento, cuando corresponda, se aplicará para estimar la incertidumbre de los resultados de todas las medidas o determinaciones cuantitativas (sean físicas, físico-químicas, químicas, biológicas o microbiológicas, excepto para el análisis de ADN) obtenidas o realizadas en los métodos de análisis dentro del Departamento de Ciencias Forenses, con el fin de proporcionar una información detallada de la calidad (confiabilidad) del resultado final y con el objetivo adicional de estandarizar el formato de informe o reporte de la estimación de incertidumbre, de forma que se facilite la comparación y valoración de los resultados de las mediciones de carácter legal y reglamentario que implica la naturaleza de las Ciencias Forenses.

### 3 Referencias:

- Adams, Thomas M. *G104 – A2LA Guide for Estimation of Measurement Uncertainty In Testing. Measurement Advisory Committee, American Association for Laboratory Accreditation (A2LA), July 2002.*
- *American Association for Laboratory Accreditation (A2LA). G104 Guide for Estimation of Measurement Uncertainty In Testing. Measurement Advisory Committee, December 2014.*
- ANAB AR 3120, ISO/IEC 17020:2012, Entidades de Inspección Forense, Requisitos de Acreditación, 2019/07/03.
- ANAB, Requisitos de Acreditación Inspección Forense AR 3120:2020, 2020/06/15.
- ANAB AR 3125, ISO/IEC 17025:2017, Laboratorios de Ciencias Forenses de Ensayo y Calibración. Requisitos de Acreditación. 2018/11/28.
- *ANSI-ASQ National Accreditation Board (ANAB). Guía sobre Incertidumbres y Trazabilidad para Instituciones Forenses (Traducción al Español). Derechos reservados de la Junta Nacional de Acreditación de ANSI-ASQ, 01 de enero de 2015.*
- [Bartlett, W. Conducting Montecarlo Analysis with Spreadsheet Programs \(2003-01-0487\). SAE International, 2003.](#)
- Bell, S. *Measurement Good Practice Guide. No. 11, Issue 2. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement. National Physical Laboratory, 1999.*
- Castro R. Actualización de formato y validación de plantillas para utilizar con el Procedimiento para la Estimación de Incertidumbre de los Análisis Forenses. Trabajo Final de Carrera de Técnico Superior en Gestor de Calidad. Ente Costarricense de Acreditación (ECA) y Universidad Técnica Nacional (UTN), Marzo-Abril 2016.
- Curso Estimación de la Incertidumbre en la Medición del Programa de Capacitación abierta. Instructor Esteban Ardón León, SCM Metrología y Laboratorios S.A., 16 horas, marzo 2011.
- Curso Norma *ISO/IEC 17043:2010 Conformity assessment – General requirements for proficiency testing* y ECA-MC-P17: Política y criterios para la participación en ensayos / pruebas de aptitud y otras comparaciones para los laboratorios, como parte del

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 4 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Programa de Capacitación abierta. Instructora Patricia Murillo Hidalgo, SCM Metrología y Laboratorios S.A., 24 horas, julio 2011.

- Chacón, Jorge. (2010). Prácticas recomendadas para determinar y reportar la incertidumbre de las mediciones en química analítica. 4 Serie Química. 1<sup>ra</sup> Reimpresión. Editorial UCR: San Pedro, Costa Rica, 2010.
- Departamento de Ciencias Forenses (DCF). Procedimiento para la estimación de incertidumbre de los análisis forenses. Manual de procedimientos de operación normados específicos. P-DCF-ECT-JEF-06, Versión 01, 2011.
- *EURACHEM/CITAC Guide CG 4*, Cuantificación de la Incertidumbre en Medidas Analíticas. 1ra. Ed. (Español, 3<sup>th</sup> Ed. Inglés). EuroLab, España, Editors S. L. R. Ellison (LGC, UK), A. Williams (UK) 2012.
- Ente Costarricense de Acreditación, ECA. ECA-MC-PO02, Política de incertidumbre de las mediciones. Versión 03 (en vigencia desde 2014).
- Guillén, E. Incertidumbre en la Medición (2012). IV Simposio de Metrología en Perú, SNM Servicio Nacional de Metrología, Indecopi; Mayo 2013, p.136
- *JCGM 100 (WG 1: BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of Uncertainty in Measurement. Free digital version (www.bipm.org), September 2008.* (denominada en este procedimiento de forma simple solamente como GUM 2008).
- *JCGM 101 (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML). Evaluación de datos de medición – Suplemento 1 de la "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida"- Propagación de distribuciones aplicando el método de Monte Carlo, 2008 (primera edición de la traducción al español, 2010).*
- Kume, Hitoshi. Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad. Grupo Editorial Norma S.A., Impreso en Colombia, 1992.
- *ISO/DTS 21748. Guide to use the expression of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation, 2002.* (Borrador de Norma Técnica o Draft Technical Standard, con versión aprobada como *ISO/TS 21748: Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation, 2004*).
- Módulo Estimación de la Incertidumbre de Medida (LABCAL-TM-03) del Curso Técnico en Metrología y Calidad del Programa de Capacitación: Metrología, Gestión de la Calidad y Gestión Ambiental. Instructor Raziél Farid Sanabria Sandí, LABCAL, Universidad de Costa Rica (UCR), 28 horas, abril a junio 2011.
- Norma ISO/IEC 17025:2017 Requisitos Generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración.
- Possolo, A. *NIST Technical Note 1900 Simple Guide for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results. National Institute of Standards and Technology (NIST), October 2015.*
- Seminario internacional Cómo controlar y mejorar la confiabilidad de sus resultados analíticos. Instructor Miguel Ángel Moreno, LaboMet Metalurgia Aplicada e Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), realizado en San José, Costa Rica, 32 horas, julio 2011.
- Sagrado, S.; Bonet, E.; Medina, M.J. y Martín, Y. Manual práctico de calidad en los laboratorios, Enfoque ISO 17025. 2<sup>da</sup>. Ed. AENOR Ediciones: Madrid, España, 2005.
- Spiridonov, V.P. y Lopatkin, A.A. Tratamiento Matemático De Datos Físico-Químicos. Editorial MIR: Moscú, URSS, 1973.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 5 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

#### 4 Equipos y Materiales:

- Ampo físico o digital "Validación de Métodos de Análisis Forenses".
- Certificados de calibración instrumentales, cuando los instrumentos de medición están calibrados o Informes de Verificación para el instrumental con OQ/PV.
- Certificados de materiales de referencia.
- Computador, con capacidad para trabajar con hoja de cálculos básicas (puede ser Excel® u OpenCalc), o calculadora científica de bolsillo (con funciones estadísticas básicas o con funciones programables).
- Diagramas de control estadístico y metrológico, para las correcciones de los certificados de calibración, cuando se cuente con los mismos y se pueda estimar la deriva instrumental en los largos plazos de calibración (o por lo menos entre dos calibraciones sucesivas).
- Diagramas o gráficos de control estadístico para procesos de medición particulares (Control de Sesgo, o Control de Dispersión).
- Formularios de control de condiciones ambientales o de otras magnitudes de influencia, cuando sean necesarios: Registro de condiciones de temperatura de un área de trabajo.
- Formulario "Registro de comprobaciones intermedias de equipos críticos de medición de masa, longitud y volumen" para el "chequeo" o "verificación" de esos equipos entre calibraciones.
- Formulario "Presupuesto de Incertidumbres" para registrar e informar por medio de un resumen de resultados, la incertidumbre combinada y sus componentes.

#### 5 Reactivos y Materiales de Referencia:

Para la aplicación de este procedimiento no es necesario utilizar reactivos ni materiales de referencia de forma directa (se pueden haber utilizado de forma indirecta en la obtención de los resultados).

#### 6 Condiciones Ambientales:

Se deben seguir las condiciones ambientales indicadas en cada procedimiento específico.

#### 7 Procedimiento:

##### 7.1. Selección del procedimiento de estimación de mayor conveniencia

**7.1.1.** Establezca el procedimiento de estimación que más se ajuste a la información de base que posee para el cálculo o estimación de incertidumbres que se pretende. Esto significa, que se debe seleccionar entre, ya sea el enfoque de "abajo hacia arriba" (procedimientos detallados, tanto en el apartado 7.2, como en el apartado numérico alternativo 7.3), o el enfoque de "arriba hacia abajo" (varios procedimientos detallados en el apartado 7.4, para los cuales, también se puede utilizar si se desea todo lo establecido en el apartado numérico alternativo 7.3). Para tomar la decisión, se recomienda realizar primero la lectura del Anexo Número 01, Teoría y Prácticas recomendadas sobre la estimación de incertidumbre de las mediciones, así como los encabezados de introducción que se encuentran justo debajo de cada uno de los títulos de los procedimientos en los apartados 7.2, 7.3 y 7.4.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 6 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**7.1.2.** Diríjase al apartado correspondiente, de acuerdo a la elección realizada en el paso anterior con base en la mejor información disponible y el conocimiento de los métodos de estimación propuestos.

**Nota N.º 1:** Independientemente del procedimiento que se utilice, en el Formulario Presupuesto de Incertidumbres se debe dejar registro de una declaración en la que se defina el mensurando, así como de una declaración de cómo se establece la trazabilidad para la medición (certificados de calibración o material de referencia certificado), incluir todos los componentes considerados para la estimación de la incertidumbre y referencia a su fuente de información, su tipo de distribución y su contribución, así como registrar la incertidumbre estándar combinada, el factor de cobertura, probabilidad de cobertura e incertidumbre estándar resultante. Además, de cada proceso de estimación de incertidumbre se debe dejar registro por medio de hojas de cálculo y documentación anexa a dichos procesos en las carpetas de calidad, según aplique, de los instrumentos de medición, análisis o aparatos auxiliares utilizados, evaluación de todos los componentes de incertidumbre considerados, cálculos, datos, las fuentes de incertidumbre, incluidos los utilizados para estimar la repetibilidad, precisión intermedia y/o reproducibilidad.

**Nota N.º 2:** En los procedimientos de operación normados específicos se debe especificar la programación para revisar y/o recalcular la incertidumbre según lo indicado en el Procedimiento para la Elaboración de Procedimientos de Operación Normados. Además, se deben mantener los registros de dicha revisión y/o recálculo junto con los demás registros del proceso de cálculo de la incertidumbre.

**7.1.3.** Identifique los registros relacionados con el proceso de estimación de incertidumbre, como el Presupuesto de Incertidumbres y registros asociados (hojas de cálculo, etc.) utilizando el siguiente código seguido de una indicación de la naturaleza del documento:

Código	Descripción
001 - FIS - INC - 2019	Corresponde al año en que se realiza la estimación de la incertidumbre.
	Hace referencia a un proceso de incertidumbre (no varía).
	Sección del DCF.
	Consecutivo en el año en que se realiza la estimación de la incertidumbre a partir de 001

## 7.2. Procedimiento de "abajo hacia arriba" o procedimiento GUM-2008

De acuerdo con la GUM-2008, ver la referencia BIPM/IEC, JCGM 100 (WG 1), la incertidumbre estándar combinada, simbolizada como  $u_c(y)$ , puede calcularse como la sumatoria de todas las incertidumbres estándar correspondientes a todas las fuentes o componentes que sean consideradas en la estimación, siempre que las mismas sean ponderadas por los coeficientes de sensibilidad correspondientes. Estos coeficientes, son directamente determinados por la dependencia del mensurando con relación a las variables de influencia y son aproximados por la expresión de una función de medición o modelo teórico (ya sea éste modelo el de una determinación directa o indirecta, explícito o implícito con relación a los argumentos de entrada que aproximan el efecto de las variables de influencia).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 7 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Lo anterior, significa que  $u_c(y)$  se evalúa considerando todas las variaciones en un mensurando, cuando este es aproximado por una función de medición, la cual será denominada como "Y" (variable dependiente matemáticamente). Las variaciones en la función de medición son debidas a las variaciones de cada una de las variables de influencia, y estas últimas son aproximadas por los argumentos de entrada denominados como " $X_i$ " (variables independientes matemáticamente). Las variaciones para cada uno de los argumentos de entrada, correspondiente al intervalo probable de valores entre  $-u(x_i)$  y  $+u(x_i)$ , generan una variación combinada en la función de medición Y o su valor "y". Esa variación combinada, corresponde al intervalo de valores probable entre  $-u_c(y)$  y  $+u_c(y)$ , el cual se denomina incertidumbre de medición o simplemente incertidumbre.

Para realizar el siguiente tratamiento, es necesario conocer previamente el sistema de medición, el método de análisis cualitativo de las fuentes o componentes de incertidumbre (para esto se recomienda consultar el primer apartado del Anexo Número 02), así como los métodos de estimación cuantitativa de la variabilidad estándar de las diferentes distribuciones de probabilidad (para esto se recomienda consultar el Anexo Número 03).

**7.2.1.** Defina el mensurando específico, el cual se denominará de forma general como Y en este procedimiento. Esto requiere definir el principio, el método y el procedimiento de medición (la descripción de esos tres en conjunto definen el sistema de medida). Con este paso se define ¿qué se mide? y ¿cómo se mide?, de forma descriptiva o con la ayuda de un diagrama de flujo sencillo.

**Nota N.º 3:** La especificación de un mensurando requiere el conocimiento de la naturaleza de la magnitud y la descripción detallada del fenómeno, del estado del cuerpo o sustancia para la cual la magnitud es una propiedad; incluyendo los componentes físicos pertinentes, las entidades químicas involucradas y en algunos casos los estados e interacciones biológicas o microbiológicas del sistema de estudio.

**Nota N.º 4:** Desde este enfoque de estimación, una definición del mensurando debe considerar las variables de influencia de acuerdo con su importancia, por lo tanto se pueden incorporar ciertas condiciones ambientales, condiciones de muestreo e incluso características metrologías de los instrumentos. Entre más detallada o exhaustiva sea la definición de un mensurando, mayor control es necesario en las magnitudes de influencia, mejor control y calidad en la calibración de los instrumentos, así como mayor dedicación o prolijidad en la aplicación del procedimiento de medición por parte del analista que lo ejecuta.

**Nota N.º 5:** Ejemplos de la definición de mensurando (descripción de la medida)

a- Un mensurando general Y, estimado por el valor "y", bajo condiciones de repetibilidad, el cual se conoce que depende de las magnitudes de entrada o magnitudes de influencia  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  (cuando la dependencia es explícita, aunque la dependencia podría ser implícita), estimadas por los valores " $x_1$ ", " $x_2$ ", " $x_3$ ",  $\dots$ , " $x_N$ ". Además se considerará que todas las magnitudes de influencia serán controladas con instrumentos de medición para los cuales se tienen certificados de calibración con trazabilidad documentada y con las cartas de control para la verificación de su deriva en el largo plazo (ver como ejemplo de aspectos a considerar en la definición de un mensurando, el procedimiento A2.1 descrito en el Anexo Número 02).

b- El porcentaje de humedad relativa (%HR), medido diez veces utilizando un higrómetro dentro de un laboratorio de calibración con condiciones de presión positiva,

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 8 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

con temperatura y presión controladas rigurosamente. Tanto el higrómetro, el termostato, el termómetro, como el barómetro se encuentran calibrados y bajo control estadístico (se podrían especificar características metrológicas de los instrumentos).

c- La longitud de una huella de frenado ( $D$ ), expresada en metros, observada sobre las diferentes superficies de rodamiento que forman parte de la infraestructura vial y en las condiciones ambientales de campo (tan variadas y sin control sobre las mismas, que pueden existir en un país tropical como Costa Rica). La distancia observada puede ser obtenida por la comparación de una sola medición de la marca visible (o en algunas ocasiones por varias réplicas de la medición), ya sea con respecto a una cinta métrica no calibrada o con respecto un odómetro no calibrado (aunque podría mejorarse el tratamiento con la calibración correspondiente de cualquiera de los instrumentos).

d- La velocidad de un vehículo ( $V$ ), expresada en km/h, obtenida a partir del teorema de trabajo-energía y de la leyes dinámicas establecidas por Newton, por medio de la longitud de la huella de frenado en metros, obtenida por una sola medición con una cinta métrica no calibrada), el coeficiente de fricción de la superficie de rodamiento (obtenido por la diez mediciones con un acelerómetro *Skidman* calibrado), la inclinación o la pendiente de la carretera (obtenida por la medición por las diez mediciones con un clinómetro no calibrado) y la gravedad (considerada como  $9,8 \text{ m/s}^2$  para todos los casos, excepto cuando se pueda estimar la gravedad local o porque se pueda medir directamente con un gravitómetro de campo), siguiendo el PON aprobado en la Sección de Ingeniería Forense.

e- La velocidad de un vehículo ( $V$ ), expresada en km/h, obtenida a partir del análisis de imagen forense de un video registrado, por medio de la estimación de longitudes en las imágenes del video dubitado (establecida por la comparación de longitudes con respecto a una imagen de referencia levantada en escena con "mirillas" de dimensiones establecidas, utilizando métrica en pixeles) y la estimación del tiempo en el video (establecida por las características estándar, utilizando métrica de cuadros por minuto o segundo), siguiendo el procedimiento aprobado en la Sección de Imagen y Sonido Forense.

f- La concentración de un analito cualquiera ( $C_x$ ), expresada en g/100g, en una muestra de alimento en polvo homogéneo, obtenida de un lote de cinco toneladas por muestreo sistemático de 5 kg con diez incrementos de muestra para obtener una muestra bruta de 50 kg, la cual es disminuida por cuatro "cuarteos" y moliendas alternadas hasta obtener 200 gramos de muestra para análisis con un tamaño de partícula inferior a 0,01 mm (medido con tamiz calibrado); siguiendo un procedimiento de selección de muestra aprobado y validado por el laboratorio en el que la incertidumbre por muestreo se considera despreciable. La concentración del analito en el alimento, es obtenida por comparación de las absorbancias obtenidas para un sextuplicado de muestras, aproximada pero exactamente de 25 g, medida en balanza analítica calibrada, por comparación con la absorbancia de una muestra aproximada pero exactamente de 0,6 g de un material de referencia certificado de pureza conocida, luego de disoluciones de los materiales sólidos, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis *DAD* calibrado, siguiendo un procedimiento de análisis aprobado y validado por el laboratorio.

g- La concentración de etanol ( $C_{EtOH}$ ), expresada en g/L, en muestras de sangre de 5 mL tomadas en tubos de vidrio de capacidad variable con fluoruro de sodio y oxalato de potasio (o EDTA como preservantes), obtenidos por la interpolación en un ajuste de



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 9 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

calibración, del valor promedio de las respuestas relativas de áreas de pico cromatográfico, obtenidas por duplicado. El ajuste de calibración utilizado presenta 10 niveles de concentración por triplicado, no ponderados, entre 0,30 g/L y 4,00 g/L con respuestas homocedásticas; con materiales de referencia certificados y utilizando propanol como *ISTD*. Para el ajuste de calibración y la determinación se utiliza un instrumento *HS-GC-FID/FID* verificado y bajo control estadístico (*OQ-PV: Operational Qualification-Performance Verification*), siguiendo el PON aprobado y validado por la Sección de Toxicología.

h- La masa de plomo ( $m_{pb}$ ), expresada en ng, obtenida a partir de los factores de dilución en la preparación y el volumen de disolución utilizados en la extracción de un "frotis" con algodón ("cotton swabs") y por la interpolación en un ajuste de calibración, del valor promedio de las respuestas, obtenidas por triplicado. El ajuste de calibración ponderado utilizado presenta un intervalo de concentraciones de 20 µg/L a 2000 µg/L con respuestas heterocedásticas, con materiales de referencia certificados. Para el ajuste de calibración y la determinación se utiliza un instrumento *ICP-OES* bajo control estadístico, siguiendo el PON aprobado y validado por la Sección de Pericias Físicas.

**7.2.2.** Defina tan detalladamente como sea necesario, la función de medición del mensurando. Con este paso, queda totalmente claro ¿cómo se mide? y además se aclara ¿para qué se mide? De forma general para cualquier mensurando  $Y$ :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (\text{Ecuación 7.1})$$

Donde  $Y$  es la variable de salida, cada  $X_i$  es una variables o argumento de entrada en la expresión de la función ( $f$  es el operador de función), la cual puede tener cualquier forma o expresión matemática (algebraica, trascendental o mixta).

**Nota N.º 6:** El detalle de la función, depende de la definición del mensurando realizada en el primer paso, así como de la utilidad y de la calidad del resultado buscado. La definición de la función de medición se encuentra muy relacionada con la definición del modelo de medición.

**Nota N.º 7:** De la definición de la función de medición, depende si la medición del mensurando es directa o indirecta. Además, debe indicarse si se aplicarán las correcciones por errores sistemáticos o se aplicará la noción de corrección nula (*C.N.*), que implica la inclusión de una fuente de incertidumbre relacionada con correcciones no significativas. Por ejemplo, cuando la corrección es menor o prácticamente igual a la incertidumbre, ambas establecidas en el certificado, o cuando un efecto sistemático conocido es absorbido por una incertidumbre de calibración del instrumento, o incluso cuando la corrección o el efecto sistemáticos no son importantes para el valor y el uso de la medición que se realiza.

**Nota N.º 8:** Ejemplos de la función de medición

a- Determinación de la humedad relativa de un laboratorio ( $\%HR$ ):

$$\%HR = \%hr_m \quad (\text{Ecuación 7.2})$$

Como el promedio de la medición directa medido diez veces, sin correcciones o "corrección nula" (*C.N.*), porque no se aplicarán correcciones (porque no son significativas para la determinación que se pretende).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 10 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

b- Determinación de la longitud de una huella de frenado ( $D$ ), expresada en metros, se presentarán tres diferentes casos.

b1. Como la medida directa (sin replicados) y además no se aplicará corrección porque la cinta métrica no está calibrada:

$$D = d \quad (\text{Ecuación 7.3})$$

b2. Como el promedio de la medición por triplicado, sin correcciones ( $C.N.$ ), porque la corrección no es significativa con respecto a la incertidumbre:

$$D = d_m \quad (\text{Ecuación 7.4})$$

b3. Como el promedio de la medición directa por triplicado y aplicando la corrección establecida en el último certificado vigente, porque la corrección es significativa y muy diferente a la incertidumbre, que también se establece en el certificado:

$$D = d_m + C \quad (\text{Ecuación 7.5})$$

En el lado derecho de la ecuación anterior,  $C$  representa la corrección. La corrección siempre se suma respetando su signo, al valor no corregido, para corregir cualquier error sistemático conocido; la corrección es siempre el negativo del error o  $E$ . Otro enfoque, también utilizado para realizar una corrección, utiliza la multiplicación por un factor de corrección ( $f_c$  o  $F_c$ ). En este último enfoque, la expresión de la función de medición equivalente, sería:

$$D = d_m \cdot f_c = d_m \cdot F_c \quad (\text{Ecuación 7.6})$$

c- Determinación de la velocidad inicial de un vehículo ( $V_i$ ) en km/h, a partir de la huella de frenado, el coeficiente de rozamiento de la superficie de rodadura y la pendiente o inclinación de la calle. Se ejemplifican tres diferentes casos en función de la inclinación y dirección del automóvil, todos sin aplicar correcciones significativas a los argumentos.

En los tres siguientes ejemplos,  $d_m$  es la longitud de la huella de frenado en metros (obtenida como el promedio de las mediciones directas medidas diez veces),  $\mu_m$  es el coeficiente de fricción de la superficie de rodadura (obtenido como el promedio de las mediciones directas medido diez veces),  $\alpha_m$  es la inclinación o la pendiente de la carretera (obtenida como el promedio de las mediciones directas medidas diez veces) y  $g$  es la aceleración de la gravedad (considerada como  $9,8 \text{ m/s}^2$  para todos los casos, excepto cuando se pueda estimar la gravedad local con algún modelo particular, o porque se obtiene su valor de mediciones directas en el campo):

c1. Velocidad inicial, cuando no hay inclinación importante en la calle (independientemente de la dirección del automóvil):

$$V_i = \sqrt{(2 \cdot g \cdot d_m \cdot \mu_m)} \quad (\text{Ecuación 7.7})$$

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 11 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

c2. Velocidad inicial, cuando la inclinación en la calle es importante y además el automóvil ascendía sobre pendiente:

$$V_i = \sqrt{[2 \cdot g \cdot d_m \cdot (\mu_m \cos \alpha_m + \text{sen} \alpha_m)]} \quad (\text{Ecuación 7.8})$$

c3. Velocidad inicial, cuando la inclinación en la calle es importante y además el automóvil descendía sobre la pendiente:

$$V_i = \sqrt{[2 \cdot g \cdot d_m \cdot (\mu_m \cos \alpha_m - \text{sen} \alpha_m)]} \quad (\text{Ecuación 7.9})$$

d- Determinación de la velocidad de un vehículo ( $V$ ) en km/h, a partir de las imágenes de un video, con un enfoque especialmente delimitado en el ámbito de unos cuantos metros y con un registro temporalmente delimitado en el ámbito de unos cuantos segundos, expresados como minutos:

$$V = \frac{D}{t} = [\# \text{ pixeles} \cdot \text{ref}(\text{metros} / \text{pixel})] \cdot [\# \text{ cuadros} \cdot \text{std}(\text{cuadros} / \text{min})] \cdot F \quad (\text{Ecuación 7.10})$$

Donde  $F$  es un factor de conversión combinado (de valor fijo no mostrado pero exacto porque no aporta incertidumbre), que transforma los metros en kilómetros y los minutos en horas, para transformar la velocidad en m/min a km/h. El anterior, es el enfoque más simple, porque la estimación del tiempo puede implicar análisis y cálculos de frecuencias variables, y la estimación de la distancia puede implicar el uso de "mirillas" de calibración variables en su aporte a la incertidumbre en función del análisis particular de las imágenes registradas.

e- Determinación de la concentración de un analito cualquiera ( $C_x$ ), en una muestra de alimento en polvo homogéneo, expresada en g/100g:

$$C_x = \left( \frac{A_m \cdot V_f \cdot m_{std} \cdot 100}{A_{std} \cdot V_{std} \cdot m_m} \right) \cdot P \quad (\text{Ecuación 7.11})$$

Por sextuplicado, sin considerar otras correcciones significativas diferentes al factor de pureza  $P$  del estándar o material de referencia utilizado. En esta función, se incluyen las absorbancias de estándar y de la muestra, las masas del estándar y de la muestra, los volúmenes de preparación del estándar y de la muestra, así como un factor de conversión (100, exacto porque no aporta incertidumbre).

f- Determinación de la concentración de etanol en muestras de sangre ( $C_{EtOH}$ ), expresada en g/L:

$$C_{EtOH} = \frac{(A_{r,m} - b)}{m} \quad (\text{Ecuación 7.12})$$

Por interpolación de las áreas relativas duplicadas ( $n = 2$ ; por utilizar doble detector en el instrumento), sin correcciones ni ponderaciones en el ajuste de calibración (aunque

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 12 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

podría justificarse la necesidad de las ponderaciones en el tratamiento), donde  $A_{r,m}$  es el área promedio de los picos cromatográficos de alcohol en la muestra, expresadas como una relación con respecto al área de los picos de propanol, utilizado como *ISTD*;  $b$  es el intercepto de la curva de calibración y  $m$  es la pendiente de ese ajuste de calibración, ambos parámetros obtenidos por el ajuste de calibración en el que se utilizan 10 disoluciones patrón inyectadas en el instrumento con doble detector ( $j = 10$ ).

g- Determinación de la masa de plomo en "frotis" obtenidos de manos de un imputado o parte de una causa judicial,  $m_{pb}$ , expresada en ng:

$$m_{pb} = Cn \cdot F_c \cdot V \quad (\text{Ecuación 7.13})$$

Donde  $Cn$  es la concentración obtenida por interpolación en un ajuste ponderado (aunque podría ser no ponderado cuando aplique),  $F_c$  es el factor de dilución (utilizado en el tratamiento y preparación del "frotis") y  $V$  es el volumen de reconstitución final de la muestra.

Entre todos los ejemplos de funciones de medición anteriores, solamente la función del primer inciso a (%HR), así como la primera y segunda función del inciso "b" (ambos para  $D$ ), son funciones de medición directas, todas las demás funciones de medición se denominan funciones de medición indirectas.

**Nota N.º 9:** Para algunos autores, incluso la segunda función del inciso "b" ( $D = d_m$ ) la función de medición por medio de un promedio de varias mediciones, ya es formalmente una función indirecta, pues su estimación se realiza a partir del uso de la fórmula de un promedio.

**7.2.3.** Identifique todas las fuentes de incertidumbre del mensurando, para lo cual se puede solamente levantar una lista detallada o elaborar un diagrama de causa-efecto del tipo "espina de pescado" o diagrama de Ishikawa.

**Nota N.º 10:** Según aplique las fuentes de incertidumbre provienen generalmente de Mano de obra, Maquinaria, Método, Medición y Medio ambiente, por lo que a la hora de definir las posibles fuentes se deben considerar estos factores. En el caso de la maquinaria, los dispositivos o instrumentos deben ser evaluados contra la estimación de incertidumbre de medición cuando estos son incorporados (por ejemplo se adquiere un nuevo equipo para el proceso de análisis y/o inspección). Además, se debe realizar la revisión y/o re cálculo de la incertidumbre dependiendo del tipo de metodología considerando cambio de equipos, análisis de datos en el tiempo, calibraciones anuales, entre otros.

**Nota N.º 11:** Para la elaboración preliminar de un diagrama de Ishikawa, ver apartado de terminología y el procedimiento A2.1 del Anexo Número 02. También se pueden utilizar otros diagramas para mostrar las fuentes o componentes, tales como el diagrama de árbol (se recomienda consultar la literatura especializada adicional correspondiente).

**Nota N.º 12:** Ejemplos de identificación de las fuentes de incertidumbre

a- Listado de las fuentes de incertidumbre.

Por ejemplo, para la determinación de la concentración de etanol en muestras de sangre (alcoholemia):

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 13 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

- El área relativa de los picos cromatográficos tiene falta de repetibilidad, cuantificada por la desviación estándar de la muestra compuesta de cuatro áreas relativas, las cuales corresponden a un duplicado de inyección con doble detector.
  - El parámetro b (intercepto), tiene la dispersión del ajuste lineal.
  - El parámetro m (pendiente), tiene la dispersión del ajuste lineal.
  - La correlación entre los parámetros m y b del ajuste lineal.
  - Los tres últimos parámetros, además contemplan el efecto de la incertidumbre del instrumental y el procedimiento de las preparaciones de los patrones y del material de referencia, así como la falta de repetibilidad instrumental de las respuestas de las disoluciones utilizadas.
- b- Diagrama general de Ishikawa para fuentes de incertidumbre "macro" (incluyendo todas las posibles fuentes de incertidumbre). Con la técnica de las "6M" (Materiales, Mano de obra, Maquinaria, Método, Medición y Medio ambiente, ver Anexo Número 02), se pueden clasificar de forma macro todas las posibles fuentes de incertidumbre de medición, clasificándolas en las seis categorías mencionadas.

Por ejemplo, para la determinación de la composición química de la escoria básica obtenida en un proceso metalúrgico de elaboración de aceros, por análisis con la técnica XRF (Fluorescencia de Rayos X) se pueden considerar fuentes relacionadas con la muestra (Materiales), el técnico de ensayos (Mano de obra), el equipo instrumental (Maquinaria), la información y el registro de resultados (Método, Medición y "Maquinaria") y las condiciones ambientales (Medio ambiente), al elaborar el siguiente diagrama general:



En algunas aplicaciones, NO será posible evaluar todas las fuentes de incertidumbres representadas en un diagrama como el anterior (hay 23 fuentes o componentes diferentes en el diagrama, por ejemplo). Sin embargo, el diagrama resulta de mucha utilidad para definir prioridades y enfocar la investigación futura que es necesaria para lograr la cuantificación de todas esas fuentes (aunque al final se demuestre que solo un 20 % de las mismas, es decir como mínimo 5 de ellas son las

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 14 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

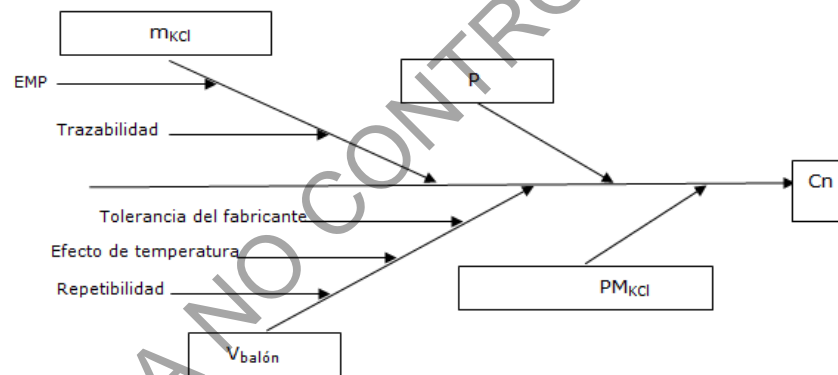
importantes, pero igualmente eso hay que demostrarlo y documentarlo en algún momento).

- c- Diagrama particular de Ishikawa para fuentes de incertidumbre "micro" (incluyendo solamente las fuentes de incertidumbre relacionadas con la función de medición).

Por ejemplo en la preparación de una disolución de KCl, en la que la concentración ( $C_n$ ) se expresa como la concentración molar (en mol/L), la cual se calcula con la siguiente función de medición:

$$C_n = \frac{m_{KCl} \cdot P \cdot 100}{PM_{KCl} \cdot V_{balón}} \quad (\text{Ecuación 7.14})$$

De acuerdo con la función de medición anterior, se pueden considerar las siguientes fuentes de incertidumbre para todas las variables de entrada o argumentos en la función:



En este caso, SI será posible evaluar todas las fuentes de incertidumbres representadas en el diagrama (hay 7 fuentes o componentes diferentes en el diagrama, por ejemplo). El diagrama resulta de mucha ayuda para identificar las componentes que se deben cuantificar (nuevamente, esto no significa que al final se demuestre que solo una, dos o tres de las mismas sean las importantes; igualmente eso hay que demostrarlo y documentarlo en este caso).

**7.2.4.** Cuantifique la variabilidad de cada fuente de incertidumbre identificada en el diagrama de Ishikawa que fue elaborado en el paso anterior (sea general o específico el diagrama) y asocie una distribución de probabilidad a cada fuente o componente considerada.

**Nota N.º 13:** Para la asignación de una distribución y la correcta cuantificación, es necesario ver completo el apartado A3.1 Características de las distribuciones que son utilizadas comúnmente en la estimación de incertidumbres, en el Anexo Número 03.

**Nota N.º 14:** Ejemplos de distribuciones de probabilidad que son utilizadas comúnmente en la estimación de incertidumbres:

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 15 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

a- Tienen distribución normal: las incertidumbres de certificados de calibración ( $U$ , incertidumbre expandida), las incertidumbres asociadas a la dispersión de más de 10 réplicas o repeticiones, para todos los datos tomados en condiciones de repetibilidad, en los que se puede utilizar la desviación estándar de la muestra  $s$ ; desviaciones estándar obtenidas por ANOVA ( $s_D$  y  $s_E$ ), así como las dispersiones combinadas o históricas obtenidas en la validación de metodologías ( $s_{comb}$ ), e incluso incertidumbres asociadas a fenómenos de carácter completamente estocástico o aleatorio (la GUM-2008 y las políticas de ANAB también contempla simulaciones o modelación de fenómenos). Pero, todo lo anterior aplica solo cuando NO se demuestre otra distribución experimentalmente, como por ejemplo distribuciones log-normal, Gumbel o Poisson, solo por mencionar algunas, pueden ser las distribuciones características de ciertos fenómenos. En cada caso se debe estimar la desviación estándar para la distribución que corresponda, tal y como lo indica la literatura especializada en estadística.

b- Tienen distribución rectangular: las especificaciones del fabricante, los errores máximos permitidos ( $a = EMP$ ) o las tolerancias de instrumentos o patrones ( $Tol = a$ ); las resoluciones o divisiones de escala (de instrumentos digitales, en los que  $a = d / 2$ ; o analógicos, en los que  $a = Ap \cdot d / 2$ ), incertidumbres asociadas a histéresis de los instrumentos (efectos de memoria o historia de los instrumentos,  $a = \Delta x_{máx}$ ), incertidumbres por truncado de una lectura ( $a = LSD / 2$ ), incertidumbres por corrección nula o no corrección ( $a = C$ ), las derivas entre varias calibraciones históricas ( $a = Der$ ) o derivas entre dos calibraciones sucesivas estimadas como rangos ( $a_+ + a_- = |C_2 - C_1|$ ), la deriva de condiciones ambientales en tiempos largos ( $a_+ + a_- = |x_f - x_i|$ ), o cualquier otra fuente de incertidumbre de la que no se tenga mayor información o alguna indicación.

c- Tienen distribución triangular: las tolerancias de equipo volumétrico ( $a = Tol$ ), la deriva de las condiciones ambientales para tiempos cortos, cuando la variación es lineal a lo largo del tiempo ( $a_+ + a_- = |x_f - x_i|$ ), las resoluciones o divisiones de escala en algunos instrumentos analógicos, en los que se recomienda  $a = d = Vd$ , se puede aplicar a los errores máximos permitidos ( $a = EMP$ ) o las tolerancias de otros instrumentos o patrones ( $a = Tol$ ), pero en estos dos últimos casos cuando se tiene mayor información sobre estos intervalos porque se indica esta distribución o aproximadamente esta distribución.

d- Tienen distribución trapezoidal: la deriva de instrumentos de medición cuando los datos son insuficientes (pocos certificados de calibración), las resoluciones o divisiones de escala (solo de algunos instrumentos analógicos, en los que  $A = d/2$  y  $B = d$ ), para los errores máximos permitidos ( $A = EMP$  y  $B = 2 \cdot EMP$ ) o las tolerancias de instrumentos o patrones ( $A = Tol$  y  $B = 2 \cdot Tol$ ), pero nuevamente en estos dos últimos casos cuando se tiene mayor información sobre estos intervalos (cuando en términos realistas no es razonable considerar discontinuidad en la región media, tal como lo implica una distribución triangular).

e- Tienen distribución en forma de "U", las condiciones ambientales cuando el control es poco robusto o con gran deriva cíclica, como por ejemplo las variaciones de las condiciones ambientales en un recinto a lo largo del día o la incertidumbre asociada a temperaturas de baños de temperatura con alta deriva cíclica (en estos casos la mayor probabilidad para la magnitud se encuentra en los extremos).

f- Tienen distribución de *t de Student*, todas las estimaciones de repetibilidad cuando el número de réplicas es menor a 10, en cuyo caso se puede valorar la necesidad de

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 16 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

corregir la incertidumbre estándar normal experimental, multiplicándola por el correspondiente factor de *t de Student* al 68,27 % y los grados de libertad respectivos (ver párrafo final del apartado A3.1, Características de las distribuciones de probabilidad que son utilizadas comúnmente en la estimación de incertidumbres, en el Anexo Número 03).

**7.2.5.** Obtenga la *incertidumbre estándar* representada por  $u(x_i)$ , para cada fuente de acuerdo con la distribución de probabilidad asignada en el paso anterior. Esto se denomina como reducción, estandarización o tipificación de las fuentes de incertidumbre.

**Nota N.º 15:** Para esto, ver apartado A3.1 Características de las distribuciones que son utilizadas comúnmente en la estimación de incertidumbres, en el Anexo Número 03.

**Nota N.º 16:** Además de lo presentado en el Anexo Número 03, debe considerarse que:

- las incertidumbres expandidas ( $U$ ) de los certificados de calibración, relacionadas con la Trazabilidad ( $T$ ), se reducen a incertidumbre estándar, dividiendo el valor de la incertidumbre expandida por el factor de cobertura, ambos indicados en el certificado de calibración. Para esto se utiliza:  $u(T) = U / k$ ,

- las dispersiones históricas ( $s_{comb}$ ), relacionadas con la repetibilidad ( $r$ ), se reducen a incertidumbre estándar, dividiendo el valor de la dispersión histórica por el numero de réplicas ( $n$ ) o las repeticiones realizadas en el momento de medición. Para esto se utiliza:  $u(r) = s_{comb} / \sqrt{n}$ , ya que sus grados de libertad son los de la medición replicada realizada (con  $n = 1$  si solo se realiza una medición sin réplicas, por ejemplo). Sin embargo, en ciertas aplicaciones puede resultar más conveniente mantener los grados de libertad de la desviación combinada histórica, por ejemplo para cuando se considera la repetibilidad de un instrumento a partir de los certificados de calibración para los niveles nominales calibrados. Es decir, que se puede utilizar también:  $u(r) = s_{comb} / \sqrt{\Sigma n}$ .

- la incertidumbre combinada que se busca, es por definición una incertidumbre estándar, que se estima por la fórmula general denominada Ley de propagación de incertidumbres, cuya expresión general es la siguiente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot u^2(X_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \cdot r(X_i, X_j) \cdot u(X_i) \cdot u(X_j)}$$

(Ecuación 7.15)

Donde:  $u_c(y)$  es la incertidumbre combinada sobre la magnitud de interés  $Y$ ;  $\partial f / \partial X_i$  y  $\partial f / \partial X_j$  representan las derivadas parciales con relación a la fuente o componente  $i$  o  $j$ , que se evalúan (también denominados coeficientes de sensibilidad de las variables, representados por  $c_i$  o  $c_j$ );  $u(X_i)$  y  $u(X_j)$  son las incertidumbres estándar,  $r(X_i, X_j)$  es el coeficiente de correlación para variables "simultáneas" o concomitantes.

**7.2.6.** Evalúe si se deben aplicar coeficientes de correlación en las fuentes de incertidumbres. Esto es necesario cuando las mediciones se realizan emparejadas o de forma "simultánea" o concomitante y por lo tanto no son independientes estadísticamente.

**Nota N.º 17:** Por "simultáneas" o concomitantes, se debe entender a las mediciones que por el principio o método de medición implican que un valor alto de una magnitud se espera que de P-DCFGCG-JEF-001-R2, Versión 01  
Emitido y Aprobado por Unidad de Gestión de Calidad



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 17 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

un valor alto para la otra (directamente proporcionales, como en un ajuste de calibración lineal una concentración elevada se espera que produzca una respuesta elevada en un instrumento), o lo contrario (inversamente proporcionales, algunos ejemplos se obtienen en variables eléctricas). En ambos casos, la dispersión de una magnitud está directamente relacionada con la dispersión de la otra magnitud "simultánea" o concomitante, y de acuerdo con la teoría estadística no son independientes estadísticamente (no confundir con la independencia matemática de los argumentos de la función de medición).

**7.2.6.1** Utilice la siguiente ecuación general cuando corresponda, para estimar todos los sumandos correspondientes a las componentes que presentan correlación:

$$2 \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \cdot \text{cov}(x_i, x_j) \quad \text{ó} \quad 2 \cdot c_i \cdot c_j \cdot \text{cov}(x_i, x_j) \quad (\text{Ecuación 7.16})$$

Este sumando, se calcula para cada pareja de variable "simultáneas" o concomitantes, donde ya se estableció que  $c_i$  y  $c_j$  son las derivadas parciales de las variables correlacionadas sobre la función de medición (ó los coeficientes de sensibilidad de las variables correspondientes) y  $\text{cov}(x_i, x_j)$ , es la covarianza de las magnitudes que se encuentran correlacionadas.

Para estimar la covarianza, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$\text{cov}(x_i, x_j) = \frac{\sum [(x_i - \bar{x}_i) \cdot (x_j - \bar{x}_j)]}{n \cdot (n - 1)} \quad (\text{Ecuación 7.17})$$

Donde  $x_i$  y  $x_j$  son las dos variables correlacionadas;  $\bar{x}_i$  y  $\bar{x}_j$  son sus promedios. La covarianza también es denominada como varianza mancomunada o como varianza combinada de las dos variables y se puede calcular por algún software especializado (o por funciones de hoja de cálculo). También se puede expresar la covarianza a partir de las desviaciones estándar individuales de cada magnitud,  $u(x_i)$  y  $u(x_j)$ , que son las incertidumbres estándar de las variables correlacionadas, junto con el coeficiente de correlación. Esto permite otra forma de calcular el sumando correspondiente a la componente de correlación (la cual forma parte de la Ley de propagación de incertidumbres que se definirá y detallará en el siguiente paso). De acuerdo con lo anterior, se puede escribir:

$$\text{cov}(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) \cdot s(x_i) \cdot s(x_j) = r(x_i, x_j) \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \quad (\text{Ecuación 7.18})$$

Donde  $r(x_i, x_j)$ , es el factor de correlación, que se puede calcular ya sea directamente con algún software especializado (o por funciones de hoja de cálculo), o ya sea a partir de la covarianza y las dispersiones individuales, mediante el re-arreglo de la última ecuación:

$$r(x_i, x_j) = \frac{\text{cov}(x_i, x_j)}{s(x_i) \cdot s(x_j)} = \frac{\text{cov}(x_i, x_j)}{u(x_i) \cdot u(x_j)} = \text{cor}(x_i, x_j) \quad (\text{Ecuación 7.19})$$

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 18 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Esto significa que cada término de correlación también se puede escribir como:

$$2 \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \cdot r(x_i, x_j) \cdot s(x_i) \cdot s(x_j) \quad \text{ó} \quad 2 \cdot c_i \cdot c_j \cdot r(x_i, x_j) \cdot s(x_i) \cdot s(x_j) \quad (\text{Ecuación 7.20})$$

**Nota N.º 18:** Todos los casos de ajustes de calibración son ejemplos de tratamientos en los que se debe considerar la existencia de correlación. Esto cuando el tratamiento de ajuste es correlacionado. Se podría realizar un ajuste sin correlación entre los parámetros, realizando una transformación de la variable independiente  $x$ , por ejemplo, cuando se utiliza el tratamiento descrito en uno de los ejemplos de la GUM 2008, o realizando el tratamiento que se detalla por Spiridonov (1973). Cuando no se realiza la transformación mencionada por el ejemplo de la GUM 2008, o por el autor mencionado, se debe considerar la correlación entre pendiente e intercepto ( $r_{m,b}$ ), o equivalentemente  $cor(m,b)$ , ver Ecuación 7.19. De la misma forma, se debe considerar la correlación entre los diferentes parámetros para otros ajustes no lineales en su forma o expresión matemática.

**7.2.6.2** Utilice las siguientes ecuaciones, cuando se ha realizado un ajuste de regresión lineal, para estimar la correlación entre la pendiente y el intercepto, denominado como  $r(m,b)$ , según corresponda:

- 1- Para un ajuste de regresión ponderado (simplemente ponderado o doblemente ponderado):

$$r_{m,b} = cor(m,b) = \frac{-\sum_{i=1}^j w_i \cdot x_i}{\sqrt{\left( \sum_{i=1}^j w_i \right) \cdot \left[ \sum_{i=1}^j (w_i \cdot x_i^2) \right]}} \quad (\text{Ecuación 7.21.a})$$

Donde  $j$  corresponde al número de pares ordenados,  $w_i$  es el peso y  $x_j$  es el valor de la variable independiente del ajuste (nótese que en la ecuación hay un signo negativo en el numerador). Esto obedece a que en el ajuste de regresión lineal, para un centroide de gravedad fijo para los datos del ajuste, un aumento en la pendiente disminuye el intercepto, mientras que una disminución en la pendiente aumenta el intercepto.

- 2- Para un ajuste simple o básico (sin ponderación numérica, ni ponderación simple o doble), la ecuación anterior, se puede simplificar a:

$$r_{m,b} = cor(m,b) = \frac{-\sum_{i=1}^j x_i}{\sqrt{j \cdot \sum_{i=1}^j x_i^2}} \quad (\text{Ecuación 7.21.b})$$

Donde  $j$  corresponde al número de pares ordenados,  $x_j$  es el valor de la variable independiente del ajuste y  $k$  es el número total de niveles del ajuste (nótese nuevamente que en la ecuación hay un signo negativo en el numerador, por lo

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 19 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

tanto, a menos que el coeficiente de correlación sea cero, el valor de este coeficiente siempre es negativo).

**Nota N.º 19:** A partir de este punto, se puede seguir el procedimiento alternativo detallado en el sub-apartado 7.3, el cual corresponde al cálculo numérico de incertidumbres por el método de Kragten modificado. Este método se encuentra validado por el trabajo final de aplicación realizado por Castro (ver referencia), como parte de la Carrera de Técnico Superior en Gestor de Calidad (ECA-UTN).

**7.2.7.** Estime la incertidumbre combinada (o las incertidumbres combinadas agrupadas que sean necesarias), aplicando la fórmula general que se presentó en la Nota N.º 16 y que se reiterará en el paso 7.2.7.1 siguiente, o cualquiera de las fórmulas específicas o particulares que se presentarán en el paso 7.2.7.2, para funciones de medición particulares.

**7.2.7.1.** Utilice la fórmula general para obtener la incertidumbre combinada (por definición es una incertidumbre estándar), la cual es denominada Ley de propagación de incertidumbres y cuya expresión es la siguiente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot u^2(X_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \left( \frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \cdot r(X_i, X_j) \cdot u(X_i) \cdot u(X_j)}$$

(Ecuación 7.15.bis)

Donde:  $u_c(y)$  es la incertidumbre combinada sobre la magnitud de interés  $Y$ ;  $\partial f/\partial X_i$  y  $\partial f/\partial X_j$  representan las derivadas parciales con relación a la fuente o componente  $i$  o  $j$ , que se evalúan (también denominados coeficientes de sensibilidad de las variables, representados por  $c_i$  o  $c_j$ );  $u(X_i)$  y  $u(X_j)$  son las incertidumbres estándar,  $r(X_i, X_j)$  es el coeficiente de correlación para variables "simultáneas" o concomitantes.

**Nota N.º 20:** Aunque el segundo sumando del lado derecho impresiona por su forma, en el paso 7.2.6.1 ya se presentó una notación compacta menos "impresionante", en el que las derivadas parciales se sustituyen por los coeficientes de sensibilidad.

**Nota N.º 21:** Para una justificación parcial, de la Ley de propagación de incertidumbres, ver apartado A3.2 Ley aditiva de la varianza y su relación con la incertidumbre combinada, en el Anexo Número 03.

**7.2.7.2.** Utilice, alternativamente, las fórmulas específicas de la Ley de propagación de incertidumbres. Existen cuatro casos particulares de la última ecuación de acuerdo con las funciones de medición (en orden creciente de complejidad), estos son:

1 - Función directa lineal o indirecta lineal (con sólo sumas y restas de las variables de entrada y sin multiplicaciones por factores diferentes a uno) con variables no correlacionadas, en donde la Ley de propagación de incertidumbres se reduce a:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (1)^2 \cdot u^2(X_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(X_i)} \quad \text{(Ecuación 7.15.a)}$$

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 20 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

2 - Función indirecta no lineal (con sólo multiplicaciones y divisiones de las variables de entrada, incluso con multiplicaciones por factores diferentes a uno) con variables no correlacionadas, en donde la Ley de propagación de incertidumbres se reduce a:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{y}{x_i}\right)^2 \cdot u^2(X_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{y}{x_i} \cdot u(X_i)\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(X_i)]^2} \quad (\text{Ecuación 7.15.b})$$

3 - Función directa lineal o indirecta lineal (con sólo sumas y restas de las variables de entrada y sin multiplicaciones por factores diferentes a uno) con variables correlacionadas, en donde la Ley de propagación de incertidumbres se reduce a:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (1)^2 \cdot u^2(X_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (1) \cdot (1) \cdot r(X_i, X_j) \cdot u(X_i) \cdot u(X_j)} \quad (\text{Ecuación 7.15.c})$$

La ecuación anterior se reduce a:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(X_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N r(X_i, X_j) \cdot u(X_i) \cdot u(X_j)} \quad (\text{Ecuación 7.15.c1})$$

La cual, a su vez, para cuando solo hay dos términos y los mismos están correlacionados, se reduce a:

$$u_c(y) = \sqrt{u^2(X_i) + 2 \cdot r(X_i, X_j) \cdot u(X_i) \cdot u(X_j) + u^2(X_j)} \quad (\text{Ecuación 7.15.c2})$$

4 - Función indirecta no lineal para modelos complejos con variables no correlacionadas, en donde se deben evaluar las derivadas parciales obligatoriamente (nuevamente, o de forma alternativa realizar el cálculo numérico establecido en el procedimiento 7.3). La Ley de propagación de incertidumbres para estos casos es:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 \cdot u^2(X_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial X_i} \cdot u(X_i)\right]^2} \quad (\text{Ecuación 7.15.d})$$

**7.2.8.** Valore la importancia de cada uno de los componentes sobre las incertidumbres combinadas, para detectar las incertidumbres relevantes. Esto se puede realizar para cada componente de incertidumbre primaria sobre el mensurando, y para cada componente secundaria dentro de cada componente primaria.

**Nota N.º 22:** Para realizar lo anterior, es necesario que se refiera a todos los puntos 9.1, 9.2 y 9.3; para entonces regresar a este punto del procedimiento y continuar con los pasos faltantes, relacionados con la estimación de una incertidumbre expandida.

**7.2.9.** Elija la probabilidad de cobertura ( $p$ ) expresada como fracción unitaria (este valor se puede expresar como porcentaje equivalente, pero en los cálculos siempre se utiliza como fracción unitaria).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 21 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**Nota N.º 23:** Para efectos de este procedimiento, se recomienda que esta probabilidad nunca sea menor al 95,45 % como porcentaje o 0,954 5 como fracción unitaria. El uso de porcentajes superiores se puede justificar en ciertos casos específicos. Con la probabilidad de cobertura, se estima el factor de cobertura (por el cual a su vez se multiplicará la incertidumbre combinada al obtener la incertidumbre expandida).

**7.2.10.** Verifique el cumplimiento del Teorema del Límite Central, antes de calcular la incertidumbre expandida (el factor de cobertura depende de la distribución final resultante). Esto significa evaluar el peso, ponderación o la importancia de cada una de las componentes en la combinación que se realiza para la estimación.

**Nota N.º 24:** Debe considerarse que cuando se combinan las diferentes incertidumbres estándar, indirectamente se realiza la convolución de las distribuciones de probabilidad. De manera formal, es la convolución de las distribuciones de probabilidad la que implica que se pueden combinar las incertidumbres estándar, lo cual se conoce en estadística como la Ley de sumatoria de la varianza.

**Nota N.º 25:** Para evaluar el cumplimiento del Teorema del Límite Central, se deben considerar el tipo de distribuciones y su importancia, pues de ambos factores depende que la distribución combinada resultante sea una distribución normal, aproximadamente normal, cuasi triangular, cuasi rectangular o cuasi trapezoidal. Se pueden ver ejemplos de convoluciones típicas en el apartado A3.3 Convolución de distribuciones y Teorema del Límite Central en el Anexo Número 03.

**7.2.10.1.** Evalúe la combinación o convolución de las fuentes consideradas, para definir el factor de cobertura ( $k$ ) para la estimación de la incertidumbre expandida. La obtención del factor de cobertura está relacionada con el cumplimiento del Teorema del Límite Central. En la práctica general, existen cuatro casos principalmente (algunos con posibilidades generales o específicas adicionales), que pueden surgir en la evaluación del cumplimiento del Teorema del Límite Central (en todos los casos, ver apartado A3.4, Factores de cobertura para las distribuciones predominantes más comunes, en el Anexo Número 03):

- Caso I: La distribución resultante es normal. Se utiliza la distribución normal estándar para determinación del factor de cobertura ( $k$ ) de acuerdo con la probabilidad de cobertura previamente definido ( $p$ ). Por ejemplo  $z(0,950 0) = 1,96$  ó  $z(0,954 5) = 2,00$ , u otro particular para la probabilidad a la que se desea realizar la estimación de la incertidumbre expandida, el cual debe obtenerse de las tablas de valores de  $z$ . El factor de cobertura para la estimación de la incertidumbre expandida, se calcula como el valor de la variable normal estándar para la probabilidad de cobertura  $p$  elegida y es independiente de los grados de libertad de la estimación. Para esto se utiliza:

$$k = z(p) \quad (\text{Ecuación 7.22})$$

- Caso II: La distribución resultante es normal pero la contribución de la componente de incertidumbre por repetibilidad es mayor a una tercera parte de la incertidumbre combinada (o mayor al 33,33 %). En este caso es necesario la cuantificación de los grados de libertad para todas las fuentes (ver punto 9.3.2), el cálculo de los números de grados de libertad efectivos intermedios ( $v_{\text{efectivos}}$ , los cuales se utilizan con dos cifras decimales) y los grados de libertad finales ( $v_T$ , los cuales se redondean siempre al entero menor), ambos calculados con la fórmula de Welch-Satterthwaite. Como se establece en ese punto **9.3.2**, para este caso el factor de cobertura para la estimación

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 22 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

de la incertidumbre expandida, es el valor de *t de Student* para la probabilidad de cobertura  $p$  previamente elegida y con los grados de libertad totales ( $v_T$ ) calculados en la estimación. Para esto se utiliza:

$$k = t(v_T, p) \quad (\text{Ecuación 7.23})$$

- Caso III: La distribución resultante es cuasi rectangular porque predomina una distribución rectangular. El factor de cobertura para la estimación de la incertidumbre expandida, se calcula con el valor de la probabilidad de cobertura  $p$  y para una distribución rectangular es independiente de los grados de libertad de la estimación. Para esto se utiliza:

$$k = p \cdot \sqrt{3} \quad (\text{Ecuación 7.24})$$

- Caso IV: Cuando predominan dos distribuciones rectangulares. Para este caso, existen dos posibilidades generales:

- Posibilidad general IV-A (zona constante): Si las dos rectangulares predominantes son equivalentes en importancia (valores IFI muy similares), la resultante es una distribución triangular (o cuasi triangular) y el factor de cobertura para la estimación de la incertidumbre expandida, se calcula con el valor de la probabilidad de cobertura para una distribución triangular y es independiente de los grados de libertad de la estimación. Para esto se utiliza:

$$k = (1 - \sqrt{1-p}) \cdot \sqrt{6} \quad (\text{Ecuación 7.25})$$

- Posibilidad general IV-B (zona variable): Si las dos rectangulares predominantes no son equivalentes en importancia (valores IFI diferentes), la resultante es una distribución trapezoidal (o cuasi trapezoidal) y el factor de cobertura para la estimación de la incertidumbre expandida, se calcula con el valor de la probabilidad de cobertura para una distribución trapezoidal y es independiente de los grados de libertad de la estimación. En esta posibilidad general, además existen dos posibilidades específicas y se debe elegir una de ellas, dependiendo de una relación entre el parámetro  $\beta$  característico de las distribuciones trapezoidales y el valor  $p$  de la probabilidad de cobertura elegido:

- Posibilidad específica IV-B1. Si se cumple que:

$$\beta \leq \frac{p}{(2-p)} \quad (\text{Ecuación 7.26.a})$$

Entonces el factor de cobertura se calcula como:

$$k = \left[ \frac{(1 - \sqrt{(1-p) \cdot (1-\beta^2)})}{\sqrt{1+\beta^2}} \right] \cdot \sqrt{6} \quad (\text{Ecuación 7.26.b})$$

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 23 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

- Posibilidad específica IV-B2. Si se cumple que:

$$\beta > \frac{p}{(2-p)} \quad (\text{Ecuación 7.27.a})$$

Entonces el factor de cobertura se calcula como:

$$k = \left[ \frac{p \cdot (1 + \beta)}{2 \cdot \sqrt{1 + \beta^2}} \right] \cdot \sqrt{6} \quad (\text{Ecuación 7.27.b})$$

**Nota N.º 26:** Como se puede apreciar, en todos los casos el valor del factor de cobertura  $k$ , depende del valor de la probabilidad de cobertura  $p$ . En algunos casos además depende de otros parámetros, ya sea como valores numéricos exactos, como grados de libertad, o como el parámetro  $\beta = A / B$  de una distribución trapezoidal (en donde  $A$  es la "longitud" de la base menor y  $B$  es la "longitud" de la base mayor).

**Nota N.º 27:** En los casos III y IV (tanto en sus incisos IV-A como IV-B), además es necesario realizar una valoración de la estimación realizada (esto se establece en la *GUM-2008*, ver específicamente el punto 9.3.1 de este procedimiento).

**7.2.10.2.** Estime la incertidumbre expandida, la cual en todos los casos está dada por:

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \quad (\text{Ecuación 7.28})$$

**7.2.11.** Elabore el informe de resultado de la medición (ver los formatos aceptados en el punto 10.1). Las incertidumbres combinadas o expandidas se expresan finalmente, con una o dos cifras significativas, de forma que no se incurra en errores por redondeo relativos, mayores a un 5 %.

**Nota N.º 28:** Consideraciones adicionales en relación al informe de resultados:

a- Si en la estimación de la incertidumbre combinada se obtiene el valor de 0,531 unidades arbitrarias, se puede expresar la incertidumbre como 0,53 unidades arbitrarias y no se puede expresar como 0,5 unidades arbitrarias (ya que en el primer caso el error relativo por redondeo es menor a 5% y en el segundo caso, el error relativo por redondeo es mayor a 5 %).

b- Si en la estimación de la incertidumbre combinada se obtiene el valor de 0,511 unidades arbitrarias, se puede expresar la incertidumbre ya sea como 0,51 unidades arbitrarias o ya sea como 0,5 unidades arbitrarias (en ambos casos el error relativo por redondeo es menor a 5 %, por lo que ambas expresiones se pueden utilizar).

**7.2.12.** Elabore el presupuesto de incertidumbres como resumen general (ver los cuadros de ejemplos en el Anexo Número 05) y complete el Formulario Presupuesto de incertidumbres (ver ejemplo del formato del formulario en el mismo Anexo Número 05).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 24 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**Nota N.º 29:** El presupuesto debe cumplir de forma general, con los criterios que se establecen en el Anexo Número 05. Aunque el ejemplo mostrado en el formulario de ese anexo es para una medición indirecta obtenida por función explícita de medición, si se desea aplicarlo a una medición directa, también se puede realizar (ver por ejemplo el cálculo para cada uno de los factores de la función de medición de ese ejemplo).

### 7.3. Procedimiento alternativo de cálculo numérico para la combinación de incertidumbres (procedimiento equivalente, reconocido en la GUM-2008)

De acuerdo con la Nota 4 del punto 5.1.3 de la GUM-2008, ver referencia JCGM 100 (BIPM, *et.al.*, 2008), la incertidumbre estándar combinada  $u_c(y)$  puede calcularse numéricamente reemplazando cada término  $c_i \cdot u_i(X_i)$  de la ley de propagación de incertidumbres por el valor:

$$Z_i = \frac{1}{2} \cdot [f(x_1, \dots, x_i + u(x_i), \dots, x_N) - f(x_1, \dots, x_i - u(x_i), \dots, x_N)]$$

(Ecuación 7.29)

Es decir, que  $u_c(y)$  se evalúa numéricamente calculando la variación de  $y$  (la función de medición), debida a variaciones de cada  $x_i$ , correspondientes al intervalo de valores probables de  $+u(x_i)$  y  $-u(x_i)$ , para cada argumento de entrada en la función. Entonces el valor de  $u_c(y)$  puede tomarse como el valor absoluto de  $Z_i$  (es decir  $|Z_i|$ ), y el valor del coeficiente de sensibilidad correspondiente  $c_i$  como igual a  $Z_i / u(x_i)$ , y por lo tanto el coeficiente de sensibilidad presentará el mismo signo que presente el valor de  $Z_i$ . Adicionalmente, en este procedimiento, al término  $Z_i$  se le denominará "Residual" y a su cuadrado se le denominará "Residual cuadrado" o "(Residual)<sup>2</sup>". Además, el concepto se puede ampliar a los términos de correlación, tal y como se puede apreciar en la parte final del procedimiento de este sub-apartado. Para realizar el tratamiento numérico, es necesario tener previamente estimada cuantitativamente la *incertidumbre estándar* para cada fuente o componente a considerar (realizar los pasos desde 7.2.1 hasta 7.2.6 completos, ver Nota N.º 19). Entonces realice los siguientes pasos en una hoja de cálculo (Excel® o OpenCalc).

**7.3.1.** Defina seis columnas en una primera fila, con los títulos siguientes, los cuales están relacionados con las magnitudes de entrada: "Variables", "Valores", "Incertidumbre estándar", "Grados de libertad", "Máximo" y "Mínimo".

**Nota N.º 30:** Todos estos pasos pueden realizarse primero para cada subgrupo de fuentes de incertidumbre terciarias sobre una magnitud resultado de interés, seguidamente para cada sub-grupo de fuentes de incertidumbre secundarias sobre una magnitud de entrada como magnitud resultado intermedia y finalmente para el grupo total de fuentes de incertidumbre primarias sobre una magnitud del mensurando final. Sean mediciones directas o indirectas.

**Nota N.º 31:** Se desarrollará parcialmente un ejemplo gráfico en cada paso como ayuda. La primera fila mencionada en el paso anterior, debe apreciarse de la siguiente forma:



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 25 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

F1		f <sub>x</sub>		Mínimo								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo						
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

**7.3.2.** Introduzca tantas filas como magnitudes de entrada se desea combinar en la estimación de incertidumbre, utilizando un nombre o un símbolo para representar a cada magnitud de entrada como fuente o componente de incertidumbre.

**Nota N.º 32:** Según aplique las fuentes de incertidumbre provienen generalmente de Mano de obra, Maquinaria, Método, Medición y Medio ambiente, por lo que a la hora de definir las posibles fuentes se deben considerar estos factores. En el caso de la maquinaria, los dispositivos o instrumentos deben ser evaluados contra la estimación de incertidumbre de medición cuando estos son incorporados (por ejemplo se adquiere un nuevo equipo para el proceso de análisis y/o inspección). Además, se debe realizar la revisión y/o recálculo de la incertidumbre dependiendo del tipo de metodología considerando cambio de equipos, análisis de datos en el tiempo, calibraciones anuales, entre otros.

**Nota N.º 33:** En el ejemplo a considerar, es necesaria una la correlación o  $cor(m,b)$ , entre la pendiente (m) y el intercepto (b), debido a que se desarrolla una interpolación de una regresión o curva de calibración. De acuerdo con la nota 31, por el momento, se tiene lo siguiente:

A5		f <sub>x</sub>		cor(m,b)								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo						
1												
2	Repuesta											
3	Pendiente											
4	Intercepto											
5	$cor(m,b)$											
6												
7												
8												
9												
10												

**7.3.3.** Llene las cuatro primeras columnas con los valores numéricos correspondientes. Adicionalmente, para el caso de las columnas "Máximo" y "Mínimo" y para cada fila de una magnitud de entrada (excepto para la línea de la componente de correlación entre m y b), edite en la columna "Máximo" una ecuación de suma (definida como "Valores" + "Incetidumbre estándar" de la respectiva fila) y edite en la columna "Mínimo" una ecuación de resta (definida como "Valores" - "Incetidumbre estándar" de la respectiva fila).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 26 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**Nota N.º 34:** Para realizar lo anterior, se introducen datos típicos en las celdas definidas hasta ahora, por lo que para el ejemplo, se debe observar la hoja como:

F4		fx		=+B4-C4								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo						
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811						
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174						
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972						
5	cor(m,b)											
6												
7												
8												
9												
10												

Tal y como se estableció en el encabezado de este sub-apartado, preliminarmente se debe haber estimado la incertidumbre estándar para cada una de las componentes o argumentos de entrada de la función de medición (cálculo no presentado para este ejemplo en desarrollo).

**7.3.4.** Utilice el nombre o símbolo para representar la magnitud resultado de interés, dos líneas por debajo de la última fila de componentes o fuentes de incertidumbre, bajo la columna de "Variables". En la celda lateral derecha a ese nombre o símbolo, bajo la columna "Valores", edite como ecuación a la función de medición para la magnitud resultado de interés, utilizando todas las celdas para cada magnitud de entrada con referencia fija (CUIDADO: esto es trascendental para lo siguiente, asegúrese que todas las celdas de magnitudes de entrada están con referencia fija, \$Columna\$Fila de cada celda).

**Nota N.º 35:** Para el ejemplo en desarrollo, la magnitud resultado de interés es "Interpolación" y la función de medición es la respuesta menos el intercepto y este resultado se divide entre la pendiente del ajuste, por lo que la hoja quedaría como (se ha generado además un recuadro en el formato de las celdas contenidas en la matriz A1:F5, para separar los datos utilizados como base en la estimación, del resultado de la función de medición):

B7		fx		=+(\$B\$2-\$B\$4)/\$B\$3								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo						
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811						
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174						
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972						
5	cor(m,b)											
6												
7	Interpolación	175.3974										
8												
9												
10												

Se muestra la ecuación (de referencias fijas con respecto a las celdas de la columna "Valores"), en la celda de la función de medición para este caso, correspondiente al valor denominado como "Interpolación".

**7.3.5.** Defina cinco columnas adicionales en la misma primera fila del paso 7.3.1, con los títulos siguientes: "MÁXIMO", "MÍNIMO" (PRECAUCION: no confundir estas dos columnas en

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 27 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

mayúscula, con las definidas para los argumentos de entrada en letras minúsculas), "Residual", "(Residual)<sup>2</sup>" y "Coeficiente de sensibilidad".

**Nota N.º 36:** Estas columnas están relacionadas con la magnitud del resultado de interés o con el mensurando. Ahora esa primera fila debe apreciarse de la siguiente forma:

K1		Coeficiente de Sensibilidad										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coeficiente de Sensibilidad	
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811						
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174						
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972						
5	cor(m,b)											
6												
7	Interpolación	175.3974										
8												
9												
10												

**7.3.6.** Revise nuevamente la función del mensurando que se editó como ecuación con referencias fijas de cada celda en el paso 7.3.3. Si la fórmula editada en esta celda no tiene ningún error (ni matemático ni lógico en su edición), copie esta ecuación para cada magnitud de entrada (excepto para la línea o líneas de cualquier componente de correlación, en este caso solo hay una línea de correlación entre m y b), tanto en la columna de "MÁXIMO", como en la columna de "MÍNIMO" que corresponden a la magnitud de interés que fueron definidas en el paso 7.3.5 anterior (PRECAUCION: no confundir con las columnas similares, pero en letras minúsculas, para valores relacionados con los argumentos de entrada definidos en el paso 7.3.1).

**Nota N.º 37:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, al copiar esta fórmula, la hoja de cálculo se debe observar tal y como se muestra a continuación:

G2		=+(SB\$2-SB\$4)/SB\$3										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coeficiente de Sensibilidad	
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.3974	175.3974				
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	175.3974	175.3974				
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	175.3974	175.3974				
5	cor(m,b)											
6												
7	Interpolación	175.3974										
8												
9												
10												

Obsérvese que todos los valores en cada celda de "MÁXIMO" y "MÍNIMO" deben ser iguales entre sí e iguales al valor en la celda B7, debido a que las celdas de referencia de la ecuación se encuentran fijas. Si esto no es así, puede que la referencia fija de la ecuación definida en B7 no sea correcta (en ese caso, revisar y realizar las correcciones correspondientes, para de nuevo copiar lo que se indicado en el paso anterior).

**7.3.7.** Re-edite las ecuaciones de cada celda de la columna "MÁXIMO" (en las que se encuentra el mismo valor para la magnitud resultado de interés para la estimación). Para cada línea de los argumentos de entrada, se sustituye en la fórmula la referencia a la celda de la columna

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 28 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

“Valores” (porque fue copiada originalmente con referencia fija a esa columna), por la celda de la columna “Máximo” pero solo de la magnitud de entrada de esa fila (PRECAUCION: esto debe realizarse tantas veces como aparezca la magnitud de entrada en la función de medición, de otra forma se sesga el análisis numérico).

**Nota N.º 38:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, lo realizado hasta ahora quedaría como se muestra a continuación:

G4		=+(\$B\$2-\$E\$4)/\$B\$3										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.3974				
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.3974				
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.3974				
5	cor(m,b)											
6												
7	Interpolación	175.3974										
8												
9												
10												

Se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente “intercepto”. Además, obsérvese que los valores en las celdas de “MÁXIMO” ahora son todos diferentes, porque se ha eliminado la referencia fija original a los valores de la columna B, utilizando para cada línea de fuente o componente, el valor del “Máximo” en la columna E.

**7.3.8.** Re-edite las ecuaciones de cada celda de la columna “MÍNIMO” (en las que se encuentra el mismo valor para la magnitud resultado de interés para la estimación). Para cada línea de los argumentos de entrada, se sustituye en la fórmula la referencia a la celda de la columna “Valores” (porque fue copiada originalmente con referencia fija a esa columna), por la celda de la columna “Mínimo” pero solo de la magnitud de entrada de esa fila (PRECAUCION: nuevamente esto debe realizarse tantas veces como aparezca la magnitud de entrada en la función de medición, de otra forma se sesga el análisis numérico).

**Nota N.º 39:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, las tres líneas quedarían como se muestra a continuación:

H4		=+(\$B\$2-\$F\$4)/\$B\$3										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752				
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709				
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095				
5	cor(m,b)											
6												
7	Interpolación	175.3974										
8												
9												
10												

Se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como “Intercepto”. Además, obsérvese que los valores en las celdas de “MÍNIMO” ahora son todos diferentes, porque se ha eliminado la referencia fija original a los valores de la columna B, utilizando para cada línea de fuente o componente, el valor del “Máximo” en la columna E.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 29 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**7.3.9.** Edite una ecuación para definir para cada línea de un argumento de entrada o de cada fuente, un semi-intervalo delimitado por los valores de las dos columnas que preceden a la columna I (columnas G y H). Es decir, que en la columna "Residual", se introduce la ecuación de la diferencia media entre las celdas de "MÁXIMO" y "MÍNIMO", o lo que es lo mismo, la resta de esos valores dividida entre dos, es decir ("MÁXIMO" - "MÍNIMO")/2 (PRECAUCION: no olvidar el dos como denominador, pues de otra forma se duplica la fuente de incertidumbre y se debe tener cuidado con el uso de los paréntesis en el numerador al editar la fórmula).

**Nota N.º 40:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, las tres líneas quedarían como se muestra a continuación:

I4		=+(G4-H4)/2										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	
1	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222			
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722			
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121			
5	cor(m,b)											
6												
7	Interpolación	175.3974										
8												
9												
10												

Nuevamente, se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como "Intercepto". Obsérvese que en este ejemplo, dos residuales tienen signo negativo y uno tiene signo positivo. Como se verá adelante, esto tiene relación directa con el signo del coeficiente de sensibilidad de la componente.

**7.3.10.** Edite la ecuación con el cuadrado definido a partir del cuadrado de la celda de la columna que le precede, en la columna "(Residual)<sup>2</sup>", para cada fila de un argumento de entrada. Para esto se introduce la ecuación de multiplicación o de potencia correspondiente.

**Nota N.º 41:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, quedaría como:

J4		=+I4*14										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	
1	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494		
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230		
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622		
5	cor(m,b)											
6												
7	Interpolación	175.3974										
8												
9												
10												

Nuevamente, se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como "Intercepto". En este caso, el cuadrado para la línea se obtiene como la multiplicación de dos veces el valor en la columna I precedente, aunque se puede utilizar para la celda del ejemplo, ya sea el operador de potencias (^) como I4<sup>2</sup>, o ya sea la función de potencia que permite Excel u OpenCalc, tal como POTENCIA(I4,2).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 30 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**7.3.11.** Edite la ecuación de sumatoria para los residuales cuadrados de todas las componentes o fuentes de incertidumbre, en la misma columna de “(Residual)<sup>2</sup>”, en la siguiente fila a la última fila de los argumentos de entrada. Esta celda de sumatoria contiene la combinación de todas varianzas de las fuentes o componentes (que se han estimado hasta este punto). En la celda lateral izquierda a esta sumatoria, introduzca el símbolo de sumatoria ( $\Sigma$ ) o la palabra “Sumatoria”.

**Nota N.º 42:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, quedaría como:

J6		=SUM(J2:J5)										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494		
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230		
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622		
5	cor(m,b)											
6									$\Sigma$	0.50020		
7	Interpolación	175.3974										
8												
9												
10												

**7.3.12.** Utilice el símbolo de la incertidumbre combinada,  $u_c(Y)$ , donde  $Y$  es la representación de la magnitud resultado de interés o función de medición, para colocarlo en la celda bajo la columna “Variables” ubicada tres líneas por debajo de la última fila de componentes o fuentes de incertidumbre (o equivalentemente debajo de la línea en la que se utilizó el nombre o símbolo para representar la magnitud resultado de interés). En la celda lateral derecha a la celda anterior (bajo la columna “Valores”), edite como una ecuación, la raíz cuadrada del valor numérico que se encuentra en la celda a la derecha del símbolo “ $\Sigma$ ” (o de la palabra “Sumatoria”, según sea el caso). El valor obtenido en esta celda, es la incertidumbre combinada por medio del cálculo numérico.

**Nota N.º 43:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja quedaría como:

B8		=SQRT(J6)										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494		
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230		
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622		
5	cor(m,b)											
6									$\Sigma$	0.50020		
7	Interpolación	175.3974										
8	$u_c(\text{Interpol})$	0.7072										
9												
10												

La incertidumbre combinada que se calcula es para el valor de “Interpolación). Obsérvese que este parámetro es solamente la raíz cuadrada de la sumatoria de la columna “(Residual)<sup>2</sup>”, en este punto sin considerar la correlación (línea de la fila 5 de la hoja de cálculo).

**Nota N.º 44:** En algunas aplicaciones puede que el valor obtenido en este último paso sea lo único que se busca como objetivo, por lo tanto los pasos siguientes son adicionales para completar la estimación de acuerdo con las recomendaciones de la GUM 2008. Por ejemplo,

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 31 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

algunos entes de reconocimiento o acreditación, definen en sus políticas de estimación de incertidumbres que se indique los valores para los coeficientes de sensibilidad o que se estimen los grados de libertad de la incertidumbre combinada. Para tales aspectos se pueden realizar las estimaciones como se establece en los pasos correspondientes del procedimiento 7.2, o se puede continuar con los pasos siguientes de este procedimiento 7.3 de estimación numérica.

**7.3.13.** Defina dos columnas adicionales en la misma primera fila del paso 7.3.1, con los títulos siguientes: "Importancia de las demás" e "IFI" (Importancia de la Fuente de Interés). Estas columnas están relacionados con la valoración de la importancia de las fuentes de incertidumbre sobre la incertidumbre de la magnitud resultado de interés.

**Nota N.º 45:** Ahora esa fila del encabezado principal debe apreciarse de la siguiente forma:

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI		
2	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494					
3	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230					
4	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622					
5													
6							Σ	0.50020					
7													
8													
9													
10													

**7.3.14.** Edite una ecuación para cada fila de un argumento de entrada (la fórmula se indicará en la siguiente oración), en la columna "Coeficiente de Sensibilidad". Utilice como fórmula para cada línea, una ecuación con la división o cociente entre las celdas de "Residual" e "Incertidumbre estándar" (es decir, el cociente "Residual"/"Incertidumbre estándar"). El signo de cada coeficiente permite predecir el efecto positivo o negativo de una variación positiva para la magnitud de influencia de esa línea. Además, recuérdese que para la combinación este signo no tiene importancia debido a que los términos se elevan al cuadrado (excepto para los términos de correlación como se verá más adelante).

**Nota N.º 46:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, quedaría como:

	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	
2	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	314.17			
3	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	-55104.84			
4	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	-314.17			
5												
6							Σ	0.50020				
7												
8												
9												
10												

Se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como "Intercepto".

**7.3.15.** Considere la correlación entre la pendiente y el intercepto, siguiendo los siguientes pasos:

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 32 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**7.3.15.1** Calcule el coeficiente de correlación de acuerdo con la ecuación correspondiente, esto a a partir de cualquiera de las dos ecuaciones que se muestran en el paso 7.2.6.2. El valor obtenido, se introduce en la celda de valores correspondiente a la correlación.

**Nota N.º 47:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja de cálculo quedaría como:

B5		fx -0.8155										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	314.17	
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	-55104.84	
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	-314.17	
5	cor(m,b)	-0.8155										
6									Σ	0.50020		
7	Interpolación	175.3974										
8	u <sub>c</sub> (Interpol)	0.7072										
9												
10												

Obsérvese, que no se muestra como se obtuvo el coeficiente, solo se introduce su valor, porque esto es un desarrollo parcial del ejemplo. Para el ejemplo en desarrollo, el coeficiente se calcula con la fórmula establecida en el paso 7.2.6.2. Además, se recalca que el valor de cor(m,b) siempre es negativo.

**7.3.15.2** Multiplique los valores de la incertidumbre estándar de las variables correlacionadas. Para esto edite la fórmula de multiplicación de los valores de incertidumbre en la columna de "Incertidumbre estándar", colocando la fórmula de multiplicación en la fila correspondiente a la componente de correlación y en la misma columna de "Incertidumbre estándar".

**Nota N.º 48:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, las variables correlacionadas son pendiente e intercepto, por lo que hoja de cálculo quedaría como:

C5		fx =+C3*C4										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	314.17	
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	-55104.84	
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	-314.17	
5	cor(m,b)	-0.8155	1.40E-08									
6									Σ	0.50020		
7	Interpolación	175.3974										
8	u <sub>c</sub> (Interpol)	0.7072										
9												
10												

**7.3.15.3** Introduzca los grados de libertad de la componente de correlación estimada. Los grados de libertad son los mismos que tiene el tratamiento realizado. Por ejemplo para los ajustes de regresión lineal, los grados de libertad, siempre son iguales al número de pares ordenados menos dos ( $GL = j - 2$ ), pero en otros tratamientos, los grados de libertad son siempre los grados de libertad correspondientes a las dos variables correlacionadas, generalmente el número de determinaciones menos 1 ( $GL = n - 1$ ). También pueden existir casos en los que los grados de libertad son la sumatoria de los grados de libertad de las componentes de varianza que se consideran.



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 33 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**Nota N.º 49:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, al introducir los grados de libertad del ajuste de regresión para la correlación entre pendiente e intercepto, la hoja de cálculo quedaría como:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	314.17	
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	-55104.84	
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	-314.17	
5	cor(m,b)	-0.8155	1.40E-08	8								
6									Σ	0.50020		
7	Interpolación	175.3974										
8	u <sub>c</sub> (Interpol)	0.7072										
9												
10												

**7.3.15.4** Introduzca el coeficiente de sensibilidad combinado, para esto multiplique los dos coeficientes de sensibilidad de las variables que se encuentran correlacionadas, y además multiplicados por el coeficiente numérico 2 (dos), colocando la fórmula en la fila correspondiente a al componente de correlación y en la columna denominada como "Coeficiente de Sensibilidad". Con esta operación se completan los factores que se necesitaran para calcular el aporte por la correlación a la sumatoria de residuales al cuadrado.

**Nota N.º 50:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la correlación entre la pendiente y el intercepto, implican que la hoja de cálculo quedaría como:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	314.17	
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	-55104.84	
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	-314.17	
5	cor(m,b)	-0.8155	1.40E-08	8							34624465.43	
6									Σ	0.50020		
7	Interpolación	175.3974										
8	u <sub>c</sub> (Interpol)	0.7072										
9												
10												

Obsérvese que para la fuente de correlación, no se utilizan la columna E ni la columna F de "Máximo" y "Mínimo" respectivamente.

**7.3.15.5** Calcule el aporte de la componente de correlación a la sumatoria de residuales cuadrados total, digitando la siguiente ecuación equivalente solo para la línea de la componente de correlación (se denomina ecuación equivalente, porque se expresa con los títulos de las columnas correspondientes), en la columna (Residual)<sup>2</sup>:

$$(\text{Residual})^2 = (\text{Coeficiente de Sensibilidad}) \cdot (\text{Valores}) \cdot (\text{Incertidumbre estándar})$$

(Ecuación 7.30)

Como se puede verificar, esta fórmula es equivalente a todas las expresiones establecidas en el paso 7.2.6.1 para las componentes de correlación. Esto por cuanto el factor "(Coeficiente de Sensibilidad)" ya contempla la multiplicación de los dos coeficientes y el factor numérico dos (2), el factor "(Valores)" es propiamente el valor del factor de correlación y el factor

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 34 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

“(Incertidumbre estándar)” ya contempla la multiplicación de los incertidumbres estándar de las variables correlacionadas.

**Nota N.º 51:** Para el ejemplo en desarrollo, la fórmula equivale a multiplicar la celda K5 por la celda B5 por la celda C5 (se ha generado además un recuadro adicional en el formato de las celdas contenidas en la matriz G1:J5, para recalcar los datos generados en las estimaciones de variación de la función de medición):

J5		f <sub>x</sub> =+K5*B5*C5											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Variables	Valores	Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	314.17		
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	-55104.84		
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	-314.17		
5	cor(m,b)	-0.8155	1.40E-08	8						-0.3944	34624465.43		
6									Σ	0.10576			
7	Interpolación	175.3974											
8	u <sub>c</sub> (Interpol)	0.3252											
9													
10													

Obsérvese que para la fuente de correlación, tampoco se utilizan la columna G ni la columna H de “MAXIMO” y “MINIMO” respectivamente.

**Nota N.º 52:** Es importante mencionar que el signo del aporte a la sumatoria en este caso es negativo (solamente los residuales cuadrados “verdaderos” son siempre positivos en la sumatoria o combinación de varianzas, esto no aplica para los términos de correlación que no son cuadrados “verdaderos”, sino más bien términos cruzados entre variables correlacionadas). Aunque si pueden existir casos de contribuciones de correlación que pueden llevar a valores positivos del aporte o contribución, algunas veces este aporte es negativo. Obsérvese que en este caso, este término negativo, disminuye el valor de “Σ” o “Sumatoria” y por lo tanto disminuye el valor calculado previamente para u<sub>c</sub>(Intepol). Compárense los valores de la misma celda, correspondientes a la hoja de cálculo de la Nota N.º. 50 y la Nota N.º. 49 (o incluso anteriores).

**7.3.15.6** Inserte una columna entre las columnas “J” y “K” de la hoja de cálculo desarrollada hasta este punto, con el nombre de “Aporte” para estimar el aporte absoluto de cada componente. En esta columna insertada, digite para cada línea la fórmula de valor absoluto del valor en la columna (Residual)<sup>2</sup>.

**Nota N.º 53:** Para el ejemplo en desarrollo, la hoja de cálculo se observaría como:

K5		f <sub>x</sub> =+ABS(J5)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Variables	Valores	Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	
5	cor(m,b)	-0.8155	1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	
6									Σ	0.10576			
7	Interpolación	175.3974											
8	u <sub>c</sub> (Interpol)	0.3252											
9													
10													

Se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como “cor(m,b)”.

P-DCF-GCG-JEF-001-R2, Versión 01

Emitido y Aprobado por Unidad de Gestión de Calidad

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 35 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**7.3.15.7** Calcule la suma de todos los valores absolutos correspondientes al "Aporte" de cada una de las componentes en la columna K, editando la ecuación en la celda inferior a la última componente, esto en la misma línea de la sumatoria de la columna "(Residual)<sup>2</sup>".

A esta nueva sumatoria se le denomina solo como "Suma", para diferenciarla posteriormente de la suma de las componentes de la columna "(Residual)<sup>2</sup>", a la que ya se denominó como "Sumatoria" (o "Σ").

**Nota N.º 54:** Para el ejemplo en desarrollo, la hoja de cálculo se observaría como:

K6		=SUM(K2:K5)										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17
3	Pendiente	0.003183	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17
5	cor(m,b)	-0.8155	1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43
6									Σ	0.10576	0.89463	
7	Interpolación	175.3974										
8	u <sub>c</sub> (Interpol)	0.3252										
9												
10												

**7.3.16.** Edite la ecuación siguiente, en la columna "Importancia de las demás", para cada fila de un argumento de entrada, con las celdas con los valores numéricos del "Aporte" de cada fila y de la "Suma", usando referencia fija para los dos términos de "Suma" en la ecuación:

$$\text{"Importancia de las demás"} = [ \text{"Suma"} - \text{"Aporte"} ] \cdot 100 / \text{"Suma"} \quad (\text{Ecuación 7.31})$$

(PRECAUCION: Se utiliza el valor de la celda denominada como "Suma" de los valores de la columna "Aporte" y no el valor de la celda adyacente denominada como "Sumatoria" de los valores de la columna "(Residual)<sup>2</sup>". Obsérvese que el término "Suma", que debe introducirse con referencia fija, aparece dos veces en la fórmula que se edita en este paso para cada línea). El resultado para cada fila, representa la contribución de las demás componentes a la estimación de la incertidumbre que se realiza (expresada en porcentaje o sobre la base de 100 %, lo cual justifica el factor numérico de 100 en la fórmula definida).

**Nota N.º 55:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, quedaría como:

=({\$K\$6-K5)*100/\$K\$6													
	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	
	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331		
	0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071		
	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687		
	1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911		
							Σ	0.10576	0.89463				

Se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como "cor(m,b)". Obsérvese que el término "Suma" está en la celda "K6" (aunque no se aprecie la columna A de

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 36 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

la hoja de cálculo, este corresponde a la fila 6; y también corresponde a la columna K, la cual se denominó como "Aporte"), se debe introducir con referencia fija, en este caso como \$K\$6 dos veces en la fórmula, lo cual facilita el copiado de la fórmula en la fila para cada componente.

**7.3.17.** Edite la ecuación que se indica seguidamente, en la columna "IFI" (esto significa Importancia de la Fuente de Interés, o lo que es lo mismo, la importancia de la línea o componente). Para cada fila de un argumento de entrada, con las celdas con los valores numéricos mencionados en la ecuación:

$$\text{IFI} = \text{"Importancia de la Fuente de Interés"} = 100 - \text{"Importancia de las demás"} \quad (\text{Ecuación 7.32})$$

El resultado para cada fila, representa la contribución de la componente de esa línea a la estimación de la incertidumbre que se realiza (expresada en porcentaje o sobre la base de 100 %, porque la fórmula de Importancia de las demás se había definido sobre la base del 100%).

**Nota N.º 56:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, quedaría como:

f <sub>c</sub> =100-M5											
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Incidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI
0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669
0.0000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929
0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313
1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089
						Σ	0.10576	0.89463			

Se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como "cor(m,b)" (aunque no se aprecie la columna A de la hoja de cálculo, este corresponde a la fila 5 del ejemplo en desarrollo).

**7.3.18.** Evalúe la importancia de cada componente de incertidumbre (el valor IFI), de acuerdo con todos los puntos 9.2 y 9.3, entonces continúe con los pasos siguientes de este apartado.

**Nota N.º 57:** De acuerdo con este paso y los conceptos de los puntos 9.2 y 9.3, por ejemplo, considerando la correlación, las fuentes de incertidumbre debidas a pendiente e intercepto tienen valores de importancia menores que el valor óptimo máximo de importancia de un 33,33 % (por aspectos de relación S/N de la estimación), mientras que la correlación supera ese valor máximo establecido como óptimo.

**Nota N.º 58:** Lo indicado en la nota anterior, se puede corregir levemente considerando que la correlación depende del ámbito dinámico de la metodología (ver expresiones de las ecuaciones de estimación del coeficiente de correlación entre pendiente e intercepto en el paso 7.2.6.2). Por lo tanto, se puede optimizar la propia correlación para mejorar la estimación, de forma que si se amplía el ámbito del ajuste de calibración (claro está si la linealidad de la metodología lo permite), se puede conseguir una disminución del coeficiente de correlación y por lo tanto de su aporte a la estimación. Esto, por supuesto con el concomitante cambio de la importancia de las componentes debidas a los parámetros del ajuste, porque tanto la dispersión del intercepto

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 37 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

como de la pendiente, individualmente dependen del número de puntos del ajuste y del intervalo de valores de la variable dependiente.

**7.3.19.** Estime los grados de libertad efectivos de la incertidumbre combinada obtenida, realizando los siguientes pasos, para cada fila o línea de una componente de incertidumbre. Todos los pasos, están basados en lo que se establece por la ecuación de Welch-Satterthwaite:

**7.3.19.1** Defina las siguientes dos columnas "Varianza cuadrada" y "Contribución ponderada". Como se verá, la "Contribución ponderada" es el valor de "Varianza cuadrada" dividida por el número de grados de libertad de la línea.

**Nota N.º 59:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, ahora la primera línea quedaría como:

f <sub>c</sub> Contribución ponderada													
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	Varianza cuadrada	Contribución ponderada
0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669		
0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929		
0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313		
1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089		
						Σ	0.10576	0.89463					

Estas dos columnas facilitan el cálculo numérico de los valores necesarios en la ecuación de Welch-Satterthwaite. Aunque, si se desea, se puede editar una sola ecuación con los valores correspondientes en la celda que se indicará posteriormente, se recomienda realizar lo indicado en estos pasos secuenciales, especialmente cuando se requiera refinar posteriormente la estimación porque se quiere cumplir con las recomendaciones de redondeo que también se presentarán posteriormente.

**7.3.19.2** Calcule la potencia al cuadrado del (Residual)<sup>2</sup> de cada componente, en la columna de "Varianza cuadrada". Esto es equivalente a elevar a la cuatro cada residual o la contribución sensibilizada de cada incertidumbre estándar de la componente, tal y como lo establecen los numeradores de la sumatoria en el denominador de la ecuación de Welch-Satterthwaite.

**Nota N.º 60:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja quedaría como:

f <sub>c</sub> =+J5*J5													
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	Varianza cuadrada	Contribución ponderada
0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669	0.0002231	
0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929	0.0497373	
0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313	0.0687708	
1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089	0.1555790	
						Σ	0.10576	0.89463					

Se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como "cor(m,b)" (aunque no se aprecie la columna A de la hoja de cálculo, este corresponde a la fila 5 del ejemplo en desarrollo).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 38 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**Nota N.º 61:** Nuevamente, en este caso, el cuadrado para la línea se obtiene como la multiplicación de dos veces el valor en la columna J para la línea, aunque se puede utilizar para la celda del ejemplo, ya sea el operador de potencias (^) como J5^2, o ya sea la función de potencia que permite Excel u OpenCalc, tal como POTENCIA(J5,2).

**7.3.19.3** Divida los valores obtenidos en la columna "Varianza cuadrada" de cada línea del paso anterior, por los grados de libertad correspondientes de la fila, digitados en la columna D, colocando la ecuación en la columna de "Contribución ponderada".

**Nota N.º 62:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja quedaría como:

f <sub>c</sub> =+O5/D5													
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	Varianza cuadrada	Contribución ponderada
0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669	0.0002231	0.0002231
0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929	0.0497373	0.0062172
0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313	0.0687708	0.0085963
1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089	0.1555790	0.0194474
						Σ	0.10576	0.89463					

Se muestra como ejemplo, la ecuación de la línea de la fuente denominada como "cor(m,b)" (aunque no se aprecie la columna A de la hoja de cálculo, este corresponde a la fila 5 del ejemplo en desarrollo).

**7.3.19.4** Obtenga la suma de todas las componentes de esta última columna, denominándola en la celda a la izquierda como "Denominador".

**Nota N.º 63:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja quedaría como:

f <sub>c</sub> =+SUM(P2:P5)													
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	Varianza cuadrada	Contribución ponderada
0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669	0.0002231	0.0002231
0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929	0.0497373	0.0062172
0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313	0.0687708	0.0085963
1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089	0.1555790	0.0194474
						Σ	0.10576	0.89463				Denominador	0.0344840

**7.3.19.5** Digite en la celda "C7" el texto "GL" (Grados de Libertad), para calcular en la celda a su derecha (es decir, en la celda "D7"), los grados de libertad de la estimación (pueden ser parciales o totales). En la celda a la derecha del texto "GL" de la celda "C7", o sea en la celda "D7", se edita la siguiente ecuación:

$$GL = \text{Grados de Libertad} = (\text{"Suma"})^2 / \text{"Denominador"} \\ (\text{Ecuación 7.33})$$

Donde el término "Suma", corresponde a la celda de la suma de todos los valores de "Aporte". Esto es equivalente a elevar a la cuatro una incertidumbre combinada imaginaria "total" (estimada con los valores absolutos de todas las componentes), tal y como lo establece el numerador de la ecuación de Welch-Satterthwaite.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 39 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

(PRECAUCION: Uno de los errores más comunes en la estimación de los grados de libertad con la fórmula de Welch-Satterthwaite, es que se utilizan las varianzas en los numeradores de la sumatoria del denominador de la ecuación, o se utiliza solamente el cuadrado de la incertidumbre combinada en el numerador de la ecuación. Con el procedimiento previo, se evita este error si se han seguido adecuadamente todos los pasos).

**Nota N.º 64:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja quedaría como:

f <sub>c</sub> = +K6*K6/P6													
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Incertidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	Varianza cuadrada	Contribución ponderada
0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669	0.0002231	0.0002231
0.0000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929	0.0497373	0.0062172
0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313	0.0687708	0.0085963
1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089	0.1555790	0.0194474
	GL	23.21					Σ	0.10576	0.89463			Denominador	0.0344840

**Nota N.º 65:** Cuando no hay aportes negativos en la sumatoria de componentes (generalmente debidos a correlaciones particulares de la función de medición), en la celda a la derecha del texto "GL" de la celda "C7", o sea en la celda "D7", se puede editar equivalentemente la siguiente ecuación:

$$GL = \text{Grados de Libertad} = \frac{(\text{"Sumatoria"})^2}{\text{"Denominador"}} = \frac{(\Sigma)^2}{\text{"Denominador"}} \quad (\text{Ecuación 7.34})$$

Donde el término "Sumatoria", corresponde a la celda de la suma de todos los valores de "(Residual)<sup>2</sup>". Esto es equivalente a elevar a la cuatro la incertidumbre combinada total, que en este caso si es la incertidumbre combinada real, tal y como lo establece el numerador de la ecuación de Welch-Satterthwaite.

**Nota N.º 66:** Cuando la estimación de grados de libertad es parcial, porque esta medición se va a utilizar en otra función de medición mayor, se pueden mantener dos cifras decimales en los grados de libertad. Pero si la estimación de grados de libertad corresponde a la estimación total de grados efectivos de libertad, se debe utilizar la función parte entera de este valor, es decir redondear al valor bajo. Para este ejemplo, si consideramos que no se van a realizar más estimaciones, los Grados de Libertad sería  $v_T = 23$ . Pero como este valor de concentración interpolado se puede utilizar en otra función de medición, para calcular un porcentaje de analito en una muestra por ejemplo, el valor de grados de libertad que se puede utilizar en los cálculos posteriores sería de  $v_{efectivos} = 23,21$ .

**7.3.20.** Digite en la celda "C8" el texto "Probabilidad", para digitar en la celda a su derecha (es decir, en la celda "D8"), el valor de la probabilidad de cobertura (p) que se desea utilizar para la estimación de la incertidumbre expandida. En la celda a la derecha del texto "Probabilidad" de la celda "C8", o sea en la celda "D8", se introduce el valor de probabilidad de cobertura deseado en escala unitaria. En este PON, no se permiten valores inferiores a 0,954 5.

**Nota N.º 67:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja quedaría como:

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 40 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

f <sub>α</sub> 0.95														
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	Varianza cuadrada	Contribución ponderada	
0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669	0.0002231	0.0002231	
0.00000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929	0.0497373	0.0062172	
0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313	0.0687708	0.0085963	
1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089	0.1555790	0.0194474	
						Σ	0.10576	0.89463				Denominador	0.0344840	
GL	23.21													
Probabilidad	0.9500													

**7.3.21.** Analice el cumplimiento del Teorema del límite Central. Para esto aplique completamente cada una de los conceptos indicados en los pasos 7.2.10 y 7.2.10.1, de forma que determine cuál es la distribución final resultante, a partir de la convolución de las distribuciones para cada componente y su importancia sensibilizada, que implican la combinación de varianzas sensibilizadas.

**Nota N.º 68:** La distribución final resultante de la convolución o combinación de las componentes, permite definir a partir de que distribución resultante se calculará el factor de cobertura ( $k$ ), junto con el valor de probabilidad ( $p$ ), que fue pre-establecido en el paso 7.3.20.

**Nota N.º 69:** Por ejemplo, en la interpolación desarrollada, todas las distribuciones de las componentes son normales (para la Respuesta, la pendiente, el intercepto y la correlación pendiente-intercepto), por lo que no hay duda de que su convolución o combinación llevan a una distribución final resultante que también es una distribución normal, por lo que el factor de cobertura que se puede utilizar es, ya sea la variable normal estándar (para la probabilidad de 0,954 5) o ya sea la variable de  $t$  de Student (en este caso, aunque en el ejemplo dice probabilidad de 0,950 0, debe para efectos de este PON utilizarse una probabilidad de 0,954 5 y con 23 grados de libertad).

**7.3.22.** Establezca y estime el factor de cobertura ( $k$ ). Para esto, digite en la celda "C9" el texto "k", para digitar en la celda a su derecha (es decir, en la celda "D9"), el valor del factor de cobertura de una tabla de valores pre-calculados, o la fórmula correspondiente de cálculo. Para definir la fórmula de cálculo, se debe considerar la distribución final resultante y todos los cuatro casos, con sus posibilidades generales y específicas, que fueron establecidas en el paso 7.2.10.1 del apartado 7.2 del procedimiento anterior (También se puede consultar el apartado A3.4, Factores de cobertura para las distribuciones predominantes del Anexo Número 03).

**Nota N.º 70:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja quedaría como (se han generado además otros dos recuadro en el formato de las celdas contenidas en las matrices K1:N5 y O1:P5, para separar los datos utilizados en la valoración de importancia de las componentes y los datos para estimación de grados de libertad, respectivamente):



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 41 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI	Varianza cuadrada	Contribución ponderada
0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669	0.0002231	0.0002231
0.0000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929	0.0497373	0.0062172
0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313	0.0687708	0.0085963
1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089	0.1555790	0.0194474
							Σ	0.10576	0.89463			Denominador	0.0344840
GL	23.21												
Probabilidad	0.9500												
k	2.07												

Para el caso del ejemplo se está utilizando el valor de  $t(23; 0,950 0) = 2,07$ ; que se encontraría en una tabla de valores de t de Student, o que se puede calcular con la función de estimación correspondiente que se encuentra en Excel u OpenCalc.

**7.3.23.** Estime la incertidumbre expandida ( $U$ ). Para esto, digite en la celda "A9" el texto "U(Y)", para digitar en la celda a su derecha (es decir, en la celda "B9"), la fórmula de expansión de la incertidumbre combinada, de acuerdo con la ecuación:

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \quad (\text{Ecuación 7.28.bis})$$

**Nota N.º 71:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, la hoja quedaría como (no se muestran por espacio visual, las columnas "O" y "P", correspondientes a los datos para estimación de grados de libertad):

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI
1 Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.5196	175.2752	0.1222	0.01494	0.01494	314.17	98.331	1.669
2 Pendiente	0.003183	0.0000857	8	0.003192	0.003174	174.9264	175.8709	-0.4722	0.2230	0.2230	-55104.84	75.071	24.929
3 Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.8853	175.9095	-0.5121	0.2622	0.2622	-314.17	70.687	29.313
4 cor(m,b)	-0.8155	1.40E-08	8						-0.3944	0.3944	34624465.43	55.911	44.089
									Σ	0.10576	0.89463		
7 Interpolación	175.3974		GL	23.21									
8 $u_c(\text{Interpol})$	0.3252	Probabilidad	0.9500										
9 $U(\text{Interpol})$	0.6732	k	2.07										

Obsérvese que la incertidumbre expandida, es la multiplicación del factor de cobertura (que depende de la distribución resultante y de la probabilidad de cobertura) y la incertidumbre combinada.

**7.3.24.** Refine la estimación realizada en los pasos anteriores, considerando el redondeo de todos los cálculos numéricos relevantes, aplicando la función de Excel® u OpenCalc correspondiente, de forma que no se utilicen en exceso las cifras que no son significativas. Para esto se recomienda no utilizar más de tres cifras significativas en los valores de las columnas "Incertidumbre estándar", "Residual" y "(Residual)<sup>2</sup>" (como se ve del ejemplo desarrollado, esto no se ha realizado). Las cifras de las demás columnas deben estar en función de las anteriores. Solamente no es necesario redondear los valores de la columna "Coeficientes de sensibilidad" (porque no se utilizan formalmente en ninguna estimación posterior y solamente se obtiene para reportar o conocer su magnitud y signo). Se recomienda, utilizar un mínimo de dos y un máximo de cuatro en las cifras decimales de las columnas de "importancia" de las dos últimas columnas (ver punto 9.1 para decidir esto).

**Nota N.º 72:** Para la interpolación del ejemplo en desarrollo, luego de los redondeos recomendados (no mostrados explícitamente), la hoja quedaría como:

P-DCFGCG-JEF-001-R2, Versión 01

Emitido y Aprobado por Unidad de Gestión de Calidad

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 42 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

1	Variables	Valores	Incetidumbre estándar	Grados de libertad	Máximo	Mínimo	MAXIMO	MINIMO	Residual	(Residual) <sup>2</sup>	Aporte	Coefficiente de Sensibilidad	Importancia de las demás	IFI
2	Repuesta	0.5502	0.000389	1	0.550589	0.549811	175.520	175.275	0.123	0.0151	0.0151	316.20	98.319	1.681
3	Pendiente	0.003183	0.0000857	8	0.00319157	0.00317443	174.926	175.871	-0.473	0.224	0.224	-55192.53	75.06	24.94
4	Intercepto	-0.00809	0.00163	8	-0.00646	-0.00972	174.885	175.910	-0.513	0.263	0.263	-314.72	70.72	29.28
5	cor(m,b)	-0.8155	1.40E-08	8						-0.396	0.396	34740820.81	55.91	44.09
6									Σ	0.1061	0.8981			
7	Interpolación	175.40	GL	23.00										
8	u <sub>c</sub> (Interpol)	0.33	Probabilidad	0.9500										
9	U(Interpol)	0.68	k	2.07										
10														

Obsérvese la diferencia en muchos de los valores redondeados de la hoja de cálculo de esta Nota N.º 72 con respecto a los valores no redondeados correspondientes en la hoja de cálculo de la Nota N.º 71. Además, obsérvese que la incertidumbre estándar combinada y la incertidumbre expandida no se expresan con más de dos cifras significativas y la magnitud del mensurando se expresa en acuerdo con el número de cifras correspondiente.

**7.3.25.** Complete con los datos que corresponda, el presupuesto de incertidumbres o cuadro de resumen general, utilizando el Formulario de Presupuesto de incertidumbres (ver ejemplos del llenado en Anexo Número 05, así como el formato del formulario).

**Nota N.º 73:** Tal y como se indicó en la Nota N.º 19, el método numérico de estimación presentado anteriormente, "corresponde al cálculo numérico de incertidumbres por el método de Kragten modificado". Además, "este método se encuentra validado por el trabajo final de aplicación" realizado por Castro, R. (2016), como parte de la Carrera de Técnico Superior en Gestor de Calidad impartida por el ECA y la UTN.

**Nota N.º 74:** Adicional al método numérico de estimación de incertidumbre, como método alternativo también puede ser utilizado el método de Montecarlo con base en lo descrito en el Suplemento 1 de la GUM-2008 (ver referencia JCGM 101 (BIPM, *et.al.*, 2008).

#### 7.4. Procedimiento de "arriba hacia abajo" (procedimientos *EURACHEM/CITAC*)

Los procedimientos que se presentan bajo este apartado, siguen las indicaciones establecidas por algunos organismos principalmente europeos y se relacionan específicamente con los análisis o determinaciones químicas (a diferencia del enfoque *GUM* 2008, dirigido principalmente a las determinaciones físicas o físico-químicas). Las determinaciones o análisis químicos, se puede encontrar en áreas tan diferentes como la industria de los alimentos, la industria de productos químicos, agrícolas o agroquímicos, el control de calidad de medicamentos o principios activos de la industria farmacéutica, los metabolitos o sustancias tóxicas en las áreas de la farmacología, la química-clínica y la toxicología, el control o regulación de contaminantes sanitarios, ambientales o de emisiones en la descarga de desechos, entre muchos otros. Para los organismos o instituciones que promueven estos procedimientos o enfoques, los mismos son tan reconocidos como es reconocido el método "riguroso y completo" para la estimación de incertidumbre de "abajo hacia arriba", que se establece en la *GUM* 2008.

Entre los organismos europeos que reconocen estos enfoques, se encuentra principalmente *EURACHEM/CITAC*, por ejemplo. Esto no significa que existan otros organismos internacionales, de otras regiones incluso, que aceptan los métodos de estos enfoques en sus políticas (como por ejemplo *ANAB*), o que incluso los han aceptado anteriormente dentro de sus documentos o políticas (*A2LA*, aunque se aclara que este organismo en su política

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 43 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

actualmente se enfoca principalmente en el método *GUM* 2008). Es por ese reconocimiento en algunas organizaciones, que por lo tanto, no es extraño que se encuentren mencionados en la literatura (Miller-Miller, 1994; Sagrado *et.al.*, 2005 y Chacón, 2011). Estos métodos se justifican debido a que en algunas ocasiones el esfuerzo y trabajo para seguir el procedimiento de la *GUM* es elevado y consume demasiado tiempo para muchos propósitos prácticos (Ver Anexo Número 01).

En el "modelo matemático" de base que se aplica a la función de medición para el enfoque de *EURACHEM/CITAC*, se utiliza las mismas consideraciones que el método *GUM* 2008, pero en este nuevo enfoque, las funciones de medición se utilizan ampliadas con una serie de factores unitarios, a los cuales se les asigna (cuando es posible), alguna distribución particular y una estimación de incertidumbre estándar (absoluta o relativa, aunque formalmente la mayoría de ejemplos desarrollan la estimación relativa de mayor simpleza, ya sea como porcentaje o como fracción unitaria). Junto con esta ampliación de la función con los factores unitarios, en el enfoque además se realiza una simplificación, por agrupación de componentes o aunque sea solo conceptual, de las fuentes globales de variación, tal y como se verá en detalle en el procedimiento siguiente.

**Nota N.º 75:** En el momento de elaboración de este PON y específicamente de este apartado basado en el enfoque de *EURACHEM/CITAC*, se conoce también la existencia de una guía técnica sugerida por *ISO*, la cual presenta un enfoque alternativo para este tipo de tratamientos de "arriba hacia abajo". El enfoque de *ISO* solamente se indicará de forma general en una de las notas aclaratorias en este PON, porque se considerará fuera del alcance. La guía de la *ISO* con el enfoque alternativo es la *ISO/TS 21748: 2004* (en esta guía obligatoriamente los datos de estimación siempre se deben obtener de Ensayos de Suficiencia o de Ensayos de Colaboración).

**7.4.1.** Defina el mensurando específico, el cual se denominará de forma general como *Y* en este procedimiento. Esto requiere definir el principio, el método y el procedimiento de medición (la descripción de esos tres en conjunto definen el sistema de medida). En este enfoque, además puede resultar de gran ayuda, elaborar un sencillo diagrama de flujo de toda la metodología o proceso que se aplica para obtener el mensurando (se muestran ejemplos en la Nota N.º 77). Con este paso, nuevamente se define ¿qué se mide? y ¿cómo se mide?, de forma descriptiva o con la ayuda del diagrama de flujo mencionado. Ver nuevamente la Nota N.º 3, antes de regresar a este punto.

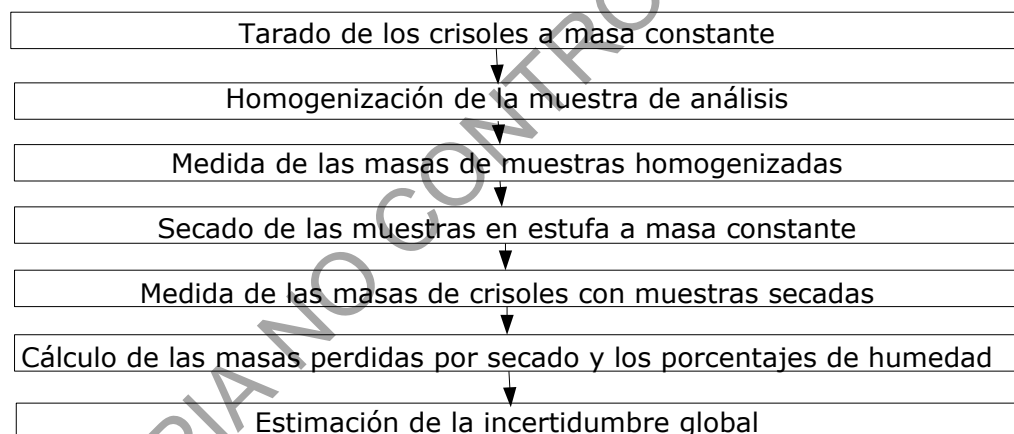
**Nota N.º 76:** Desde este enfoque de estimación, una definición del mensurando debe considerar todas las variables de influencia pero de acuerdo con su importancia (lo cual requiere conocimiento experto o empírico como destreza adicional), por lo tanto se pueden incorporar ciertas condiciones ambientales, condiciones de muestreo e incluso características de validación o de participación en Ensayos de Suficiencia (ES) o Ensayos de Colaboración (EC), cuando las mismas son críticas. Entre mayor sea el alcance de la validación y el desempeño en los ensayos inter-laboratorio, se supone que ya se tiene bajo control las magnitudes de entrada o magnitudes de influencia base, mejores controles y calidad en las calibraciones de los instrumentos, así como una dedicación o prolijidad demostrada por parte de los analistas que ejecutan los procedimientos. Es por todo lo anterior que la influencia de muchas de las magnitudes de entrada explícitas siempre es menor a otras más globales o implícitas, que de forma conjunta dominan las condiciones de prueba y conllevan una mayor variabilidad.

**Nota N.º 77:** Ejemplos de la definición de mensurando (descripción de la medida) en este enfoque:

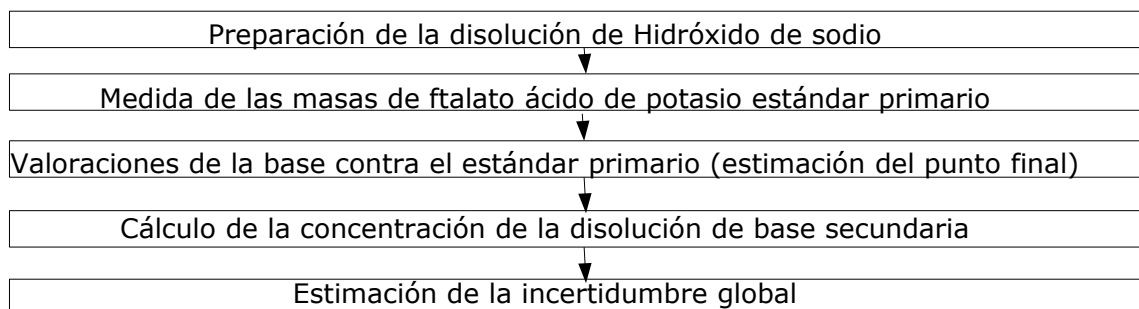
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 44 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

a- Un mensurando general  $Y$ , estimado por el valor " $y$ ", bajo condiciones de repetibilidad, el cual se conoce que depende de las magnitudes de entrada  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$  (con una dependencia explícita), estimadas por los valores " $x_1$ ", " $x_2$ ", " $x_3$ ", ... , " $x_N$ "; y se conoce que dependen de otras magnitudes de influencia (con dependencia implícita). Además se considerará que todas las magnitudes de entrada y de influencia están controladas con instrumentos de medición para los cuales se tienen certificados de calibración con trazabilidad documentada y con las cartas de control para la verificación de su deriva en el largo plazo, que se tienen parámetros estimados en diseños experimentales de validación o se llevan cartas de control de sesgo, precisión y se participa en estudios de suficiencia o colaboración, aceptados como estudios interlaboratorio respetables. Todo lo anterior, permite establecer la influencia de fuentes o componentes de incertidumbres globales, cuya dependencia podría ser solamente implícita (se conoce su efecto, aunque no aparezca directamente en la expresión de la función de medición).

b- El porcentaje de humedad que presenta un detergente previo a su empaqueo, con el fin de utilizarlo como un parámetro de control de calidad del producto elaborado en una industria de materiales de limpieza de uso doméstico:

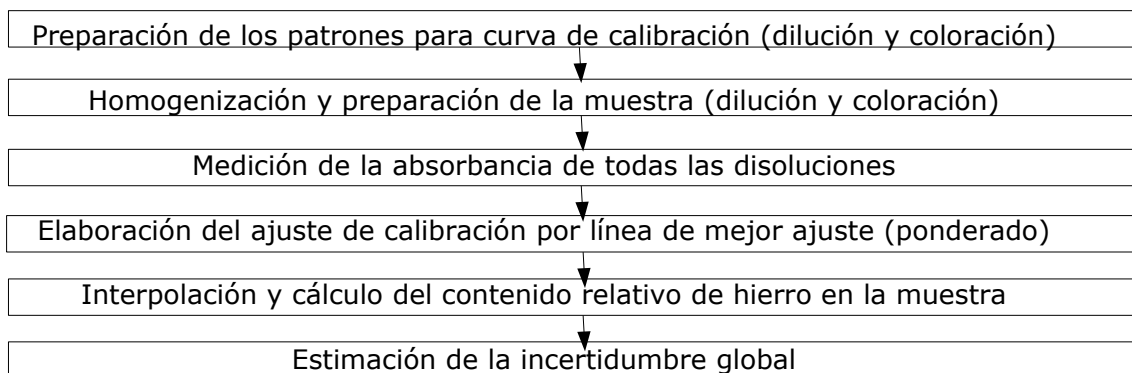


c- La valoración de una disolución base de hidróxido de sodio, contra un estándar de ftalato ácido de potasio (patrón primario), para utilizarse como patrón secundario en análisis volumétrico de laboratorio:

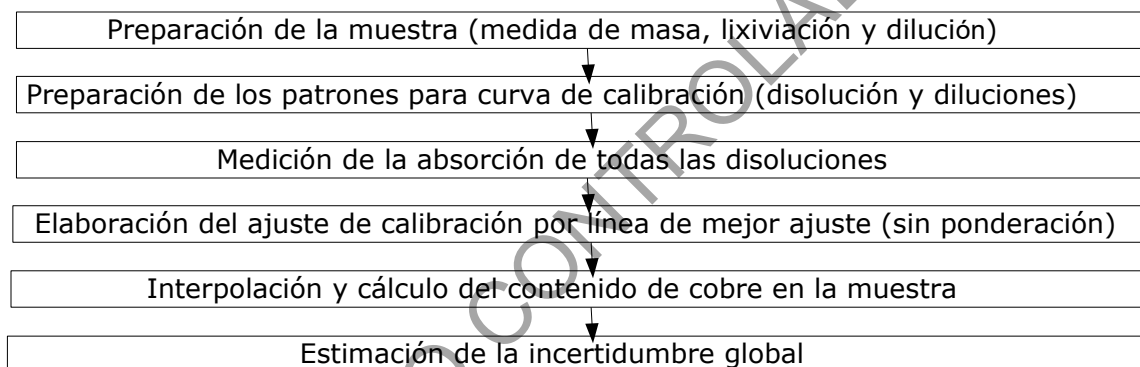


d- La determinación del contenido de hierro, como mineral, en una muestra de un suplemento vitamínico en estado líquido, por medio de la determinación colorimétrica utilizando orto-fenantrolina como reactivo generador de color:

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 45 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	



e- La determinación del contenido de cobre en una muestra de suelo por medio de espectrometría de absorción atómica con lámpara de cátodo hueco:



**7.4.2.** Defina tan detalladamente como sea necesario, la función de medición del mensurando. Con este paso, queda totalmente claro ¿cómo se mide? y además se aclara ¿para qué se mide? De forma general para cualquier mensurando Y:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (\text{Ecuación 7.1.bis})$$

Donde Y es la variable de salida, cada  $X_i$  es una variables o argumento de entrada en la expresión de la función ( $f$  es el operador de función), la cual puede tener cualquier forma o expresión matemática (algebraica, trascendental o mixta, pero se buscará simplificar de forma que se pueda expresar de forma sencilla como un productorio de argumentos). Ver nuevamente la Nota N.º 6, antes de regresar a este punto.

**Nota N.º 78:** Para los casos en que se utiliza este procedimiento, la definición de la función de medición siempre implica una medición del mensurando que es indirecta. Además, se debe indicar las correcciones y la forma en que se aplicarán las correcciones por errores sistemáticos o sesgo (o si se aplicará la noción de corrección nula, *C.N.*, que implica la inclusión de una fuente de incertidumbre relacionada con correcciones no significativas). Existen dos métodos, equivalentes para realizar lo anterior, los cuales se definirán en la siguiente nota.

**Nota N.º 79:** Aunque la función de medición se exprese como un productorio de los argumentos de entrada, la sumatoria de las varianzas que establece la Ley de propagación de la incertidumbre permite expresar el modelo estadístico de la combinación de las fuentes o

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 46 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

componentes de incertidumbres de dos formas distintas (enfoques distintos). Uno de ellos permite combinarlas de forma absoluta (enfoque *ISO*), y el otro permite combinarlas de forma relativa (enfoque *EURACHEM/CITAC*). Ambos enfoques son equivalentes en su fondo, pero estadística y matemáticamente diferentes en la forma de estimación.

a- Enfoque de *EURACHEM/CITAC* (este es el que se desarrollará en este procedimiento por su simpleza):

$$M = m_m \cdot f_{C,1} \cdot f_{C,2} \cdot f_{C,3} \cdot \dots \cdot f_{C,k} \quad (\text{Ecuación 7.35})$$

Donde  $M$  es el mensurando de interés, determinado como el promedio  $m_m$ , de una serie de mediciones repetidas  $m$  y cada factor  $f_{C,i}$  es un factor de corrección aplicable al mensurando. Ese promedio de mediciones repetidas puede obtenerse a su vez de una expresión matemática más compleja

Por ejemplo, puede ser la determinación de la concentración del analito  $x$  en una muestra de alimento en polvo homogéneo, realizada por ultravioleta visible, que se mencionó como ejemplo en el inciso "c" de la Nota N.º 8, se puede establecer:

$$C_{x,m} = \left( \frac{A_m \cdot V_f \cdot m_{std} \cdot 100}{A_{std} \cdot V_{std} \cdot m_m} \right)_m \quad (\text{Ecuación 7.36})$$

Obsérvese que el subíndice de la Absorbancia de la muestra ( $A_m$ ) y de la masa de muestra ( $m_m$ ) deben diferenciarse del subíndice fuera del paréntesis que se refiere a la media (promedio de los replicados que se analizan en todo análisis químico), además, que por ahora no se considerará el factor de pureza  $P$  fuera del paréntesis en ese ejemplo.

Para este enfoque, la última ecuación anterior se puede expresar como:

$$C_{x,m} = \left( \frac{A_m \cdot V_f \cdot m_{std} \cdot 100}{A_{std} \cdot V_{std} \cdot m_m} \right)_m \cdot f_{Amb} \cdot f_{Rec} \cdot f_{Mues} \cdot f_{std} \cdot f_{r\&R} \quad (\text{Ecuación 7.37})$$

Los factores de corrección incorporados, se consideran factores sin dimensión, con media igual a uno, que pueden corregir efectos de condiciones ambientales,  $f_{Amb}$  (temperatura, presión, humedad relativa, luminosidad, etc.), efectos de errores sistemáticos o de matriz,  $f_{Rec}$  (sesgos en general, principalmente de recuperación del analito, ya sea por disponibilidad o por el tratamiento realizado, en este caso el factor es el inverso del valor de recuperación obtenido:  $f_{Rec} = 1/Rec$ , por ejemplo), efectos de muestreo,  $f_{Mues}$  (heterogeneidad de la matriz, del proceso de homogenización o por la misma selección de los incrementos de la muestra), efectos del aporte de información del material de referencia o estándar,  $f_{MR}$  o  $f_{std}$  (por su calidad, su nivel de incertidumbre o por dudas de estimación, tales como la pureza del material,  $P$ , que no aparece considerada dentro del paréntesis para no duplicar su efecto en la determinación), así como a variaciones intra e inter-laboratorio,  $f_{r\&R}$  (factores de repetibilidad & reproducibilidad, o precisión intermedia inclusive, pero que son mayores que la dispersión de la media estimada con todos los argumentos dentro del paréntesis). En

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 47 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

este enfoque, a menos que las pruebas estadísticas demuestren lo contrario (como puede ser el caso de los factores de recuperación), cada factor multiplicativo  $f$  (o  $F$ ), se considera como una variable aleatoria, con media o esperanza matemática igual a 1. Sin embargo, cada uno de estos factores tiene su incertidumbre absoluta, estimada por medio de desviaciones estándar (Tipo A) o datos experimentales a partir de cualquier información conocida (Tipo B), y por lo tanto se puede estimar su incertidumbre relativa, ya sea expresada como porcentaje o como fracción unitaria.

Además, cualquier argumento de entrada dentro del paréntesis que genere una fuente o componente de incertidumbre de importancia elevada debe considerarse dentro de la estimación. Este no es el caso, pues generalmente, alguno de los factores (de esperanza unitaria), es o son los que dominan la importancia en la estimación que se realiza.

b- Enfoque de ISO 21748 (este solamente se menciona y no se desarrollará más allá de lo indicado en este procedimiento).

$$M = m_m + C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_k \quad (\text{Ecuación 7.38})$$

Donde  $M$  es el mensurando de interés, determinado como el promedio  $m_m$ , de una serie de mediciones repetidas  $m$  y cada sumando  $C_i$  es una corrección aplicable al mensurando (se aclara que en la norma ISO se utiliza una notación diferente a la mostrada en esta y las ecuaciones siguientes; la notación utilizada se justifica solamente para fácil comparación con la notación del enfoque de EURACHEM/CITAC). El promedio de mediciones repetidas puede obtenerse a su vez de una expresión matemática más compleja

Por ejemplo, para la misma determinación de la concentración del analito  $x$  en una muestra de alimento en polvo homogéneo, realizada por ultravioleta visible, que se mencionó como ejemplo en el inciso "c" de la Nota N.º 8 y que se re-utilizó en el ejemplo del inciso "a" anterior, se puede establecer:

$$C_{x,m} = \left( \frac{A_m \cdot V_f \cdot m_{std} \cdot 100}{A_{std} \cdot V_{std} \cdot m_m} \right)_m \quad (\text{Ecuación 7.36.bis})$$

Nuevamente, el subíndice de la Absorbancia de la muestra ( $A_m$ ) y de la masa de muestra ( $m_m$ ) deben diferenciarse del subíndice fuera del paréntesis que se refiere a la media (promedio de los replicados que se analizan en todo análisis químico) y por ahora no se considerará el factor de pureza  $P$ .

La última ecuación anterior, en este enfoque se puede expresar como:

$$C_{x,m} = \left( \frac{A_m \cdot V_f \cdot m_{std} \cdot 100}{A_{std} \cdot V_{std} \cdot m_m} \right)_m + C_{Amb} + C_{Rec} + C_{Mtes} + C_{std} + C_{r\&R} \quad (\text{Ecuación 7.39})$$

Los sumandos de corrección incorporados, se consideran componentes con la misma dimensión del mensurando, con media igual a cero, que nuevamente pueden corregir efectos de condiciones ambientales,  $C_{Amb}$  (temperatura, presión, humedad relativa, luminosidad, etc.), efectos de errores sistemáticos o de matriz,  $C_{Rec}$  (sesgos en general,

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 48 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

principalmente de recuperación del analito, ya sea por disponibilidad o por el tratamiento realizado), efectos de muestreo,  $C_{Mues}$  (heterogeneidad de la matriz, del proceso de homogenización o por la misma selección de los incrementos de la muestra), efectos del aporte de información del material de referencia o estándar,  $C_{MR}$  o  $C_{std}$  (por su calidad, su nivel de incertidumbre o por dudas de estimación, tales como la pureza del material,  $P$ , que no aparece considerada dentro del paréntesis para no duplicar su efecto en la determinación), así como a variaciones intra e inter-laboratorio,  $C_{r\&R}$  (factores de repetibilidad & reproducibilidad, o precisión intermedia inclusive, pero que son mayores que la dispersión de la media estimada con todos los argumentos dentro del paréntesis). En este enfoque, a menos que las pruebas estadísticas demuestren lo contrario (como puede ser el caso de los sesgos de recuperación), cada sumando  $C$ , se considera como una variable aleatoria, con media o esperanza matemática igual a 0. Sin embargo, cada uno de estos sumandos tiene su incertidumbre absoluta, estimada por medio de desviaciones estándar (Tipo A) o datos experimentales a partir de cualquier información conocida (Tipo B), siempre a partir de estudios de suficiencia o de colaboración. Por lo tanto se puede estimar su aporte a la incertidumbre global.

Además, cualquier argumento de entrada dentro del paréntesis que genere una fuente o componente de incertidumbre de importancia elevada debe considerarse dentro de la estimación. Este no es el caso, pues generalmente, alguno de los sumandos (de esperanza cero), es o son los que dominan la importancia en la estimación que se realiza.

c- En cualquiera de los dos enfoques, ya sea que la función de medición se exprese expandida con factores de corrección unitarios o con sumandos de corrección nulos, ambos con aporte a la incertidumbre combinada, la sumatoria de cuadrados determinada por la Ley de propagación de incertidumbres para obtener la incertidumbre combinada, se puede expresar de forma general, como:

$$u_c^2(y) = S_{r\&R}^2 + u_S^2(\hat{\delta}) + \sum_{i=k}^{N-k} c_i^2 \cdot u^2(X_i) \quad (\text{Ecuación 7.40})$$

Donde el primer término agrupa la estimación de cualquier tipo de precisión del método mediante evaluaciones de Tipo A o de Tipo B (sea como repetibilidad, precisión intermedia o reproducibilidad, como dispersión combinada, como dispersión establecida en cartas de control o incluso como la dispersión estimada en la validación interna del método), el segundo término agrupa el aporte de todos los factores de sesgo (sea por efectos de recuperación, como desviaciones de los controles de matriz utilizados, como estimaciones  $RMS$  del sesgo, o sea como el  $z$  "score" de estudios inter-laboratorio), mientras que el tercer término agrupa a todas los efectos no cubiertos por los dos primeros términos (efectos ambientales, de muestreo, de tratamiento), así como cualquier otra variable de influencia o magnitud de entrada con aporte (cuando sea importante y no se haya considerado ya como parte de alguno de los otros dos primeros términos, por eso los límites particulares de la sumatoria).

Sin embargo, de acuerdo con los dos enfoques, los últimos términos mencionados debidos a otras componentes, generalmente son despreciables en la contribución y la estimación generalmente está dominada por los dos primeros términos de la ecuación. Entre ambos enfoques, como ya se mencionó, las funciones de medición siempre serán funciones de medición indirectas, porque contemplan la interacción explícitamente de



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 49 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

una gran cantidad de magnitudes de entrada, así como implícitamente de una mayor cantidad de magnitudes de influencia, para todas las cuales, en algunos casos sus efectos sobre el mensurando se considerarán de forma "global".

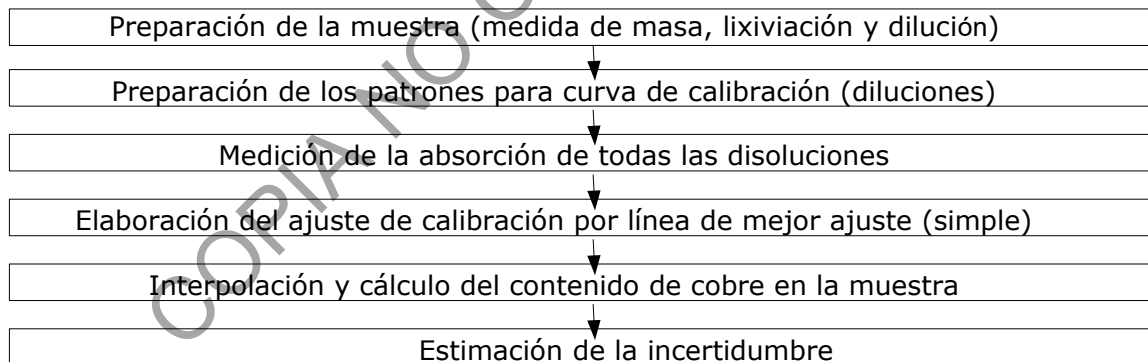
**7.4.3.** Identifique todas las fuentes de incertidumbre del mensurando, para lo cual se puede solamente levantar una lista detallada o elaborar un diagrama de causa - efecto del tipo "espina de pescado" o diagrama de Ishikawa. Ver nuevamente las Notas N.º 11 y 12, antes de regresar a este punto.

**Nota N.º 80:** Según aplique las fuentes de incertidumbre provienen generalmente de Mano de obra, Maquinaria, Método, Medición y Medio ambiente, por lo que a la hora de definir las posibles fuentes se deben considerar estos factores. En el caso de la maquinaria, los dispositivos o instrumentos deben ser evaluados contra la estimación de incertidumbre de medición cuando estos son incorporados (por ejemplo se adquiere un nuevo equipo para el proceso de análisis y/o inspección). Además, se debe realizar la revisión y/o recálculo de la incertidumbre dependiendo del tipo de metodología considerando cambio de equipos, análisis de datos en el tiempo, calibraciones anuales, entre otros.

**Nota N.º 81:** Ejemplos de identificación de las fuentes de incertidumbre

a- Listado de las fuentes de incertidumbre.

Por ejemplo, para la determinación del contenido de cobre en una muestra de suelos, a partir de un diagrama de flujo como el siguiente que ya se había presentado:



Se puede elaborar la siguiente lista de fuentes potenciales de incertidumbre o variación del resultado final (agrupadas por facilidad para cada una de las etapas del proceso del diagrama de flujo anterior):

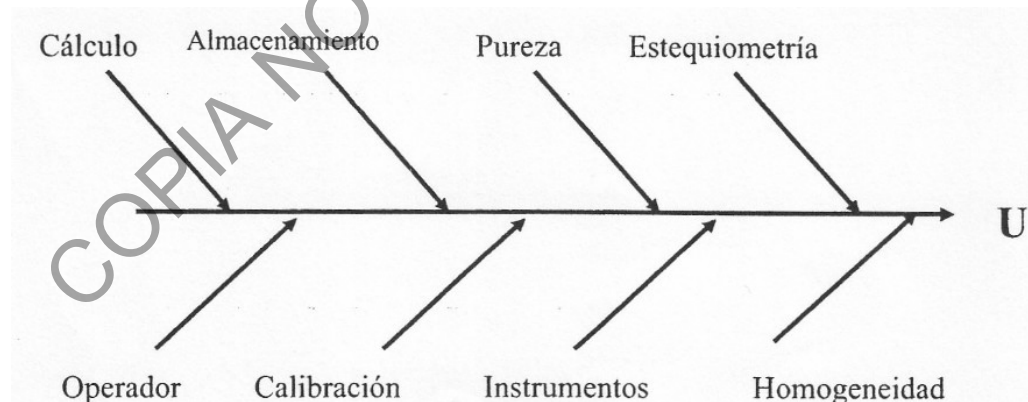
- Mediciones de masa (precisión, resolución, linealidad o trazabilidad de la balanza) del contenedor de tara y del contenedor con la muestra; mediciones de volumen (efecto de temperatura, precisión y calibración del equipo volumétrico) de la disolución preparada; recuperación del tratamiento de digestión y reacciones de química líquida (adsorciones en cristalería y sobre los residuos de la lixiviación de material insoluble en el medio de digestión).
- Mediciones de masa del material de referencia (precisión, resolución, linealidad o trazabilidad de la balanza) del contenedor de tara y del contenedor con el material

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 50 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

de referencia, mediciones de volumen (efecto de temperatura, precisión y calibración del equipo volumétrico) de la disolución madre preparada y de las diluciones para disoluciones intermedias; la pureza del material de referencia y su incertidumbre certificada; lectura de las disoluciones con el instrumento de absorción (resolución, repetibilidad, linealidad y estabilidad del instrumento, en condiciones como los flujos de gases en el quemador y corriente de la lámpara utilizada, entre otros factores).

- Tratamiento de datos para el análisis de regresión lineal, utilizando métodos de cálculo verificados y con las cifras significativas adecuadas.
  - Tratamiento de datos en el cálculo del contenido de cobre en la muestra por medio de la fórmula verificada y con el número de cifras significativas adecuadas.
- b- Diagrama general de Ishikawa para fuentes de incertidumbre "macro" (incluyendo todas las posibles fuentes de incertidumbre). Con la técnica de las "6M" (Materiales, Mano de obra, Maquinaria, Método, Medición y Medio ambiente, ver Anexo Número 02), se pueden clasificar de forma macro todas las posibles fuentes de incertidumbre de medición, clasificándolas en las seis categorías mencionadas.

Por ejemplo, para la determinación del contenido de cobre en la misma muestra de suelos del inciso "a" anterior, se pueden considerar fuentes relacionadas con la muestra (Materiales), el técnico de ensayos (Mano de obra), el equipo instrumental (Maquinaria), la información y el registro de resultados (Método, Medición y "Maquinaria") y las condiciones ambientales (Medio ambiente), al elaborar el siguiente diagrama general:



En el diagrama anterior, solamente se han indicado las fuentes de incertidumbre primarias para un análisis químico. En algunas aplicaciones, NO será posible enlistar y evaluar todas las fuentes de incertidumbre secundarias de un diagrama como el anterior (las cuales ni siquiera se encuentran representadas en el diagrama del ejemplo, pero a modo de comparación, solo la lista del inciso "a" implican una gran cantidad de fuentes).

Sin embargo, al igual que el método *GUM* 2008, el diagrama resulta de mucha utilidad para definir prioridades y enfocar la investigación futura que es necesaria para lograr la estimación buscada (aunque al final, como se verá en el siguiente paso en comparación con el siguiente inciso, generalmente se demuestre que solo

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 51 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

unas cuantas fuentes simplificadas y agrupadas son las importantes. De la misma forma, esto hay que demostrarlo y documentarlo en algún momento).

- c- Diagrama particular de Ishikawa para fuentes de incertidumbre "micro" (incluyendo todas las fuentes de incertidumbre relacionadas con la función de medición).

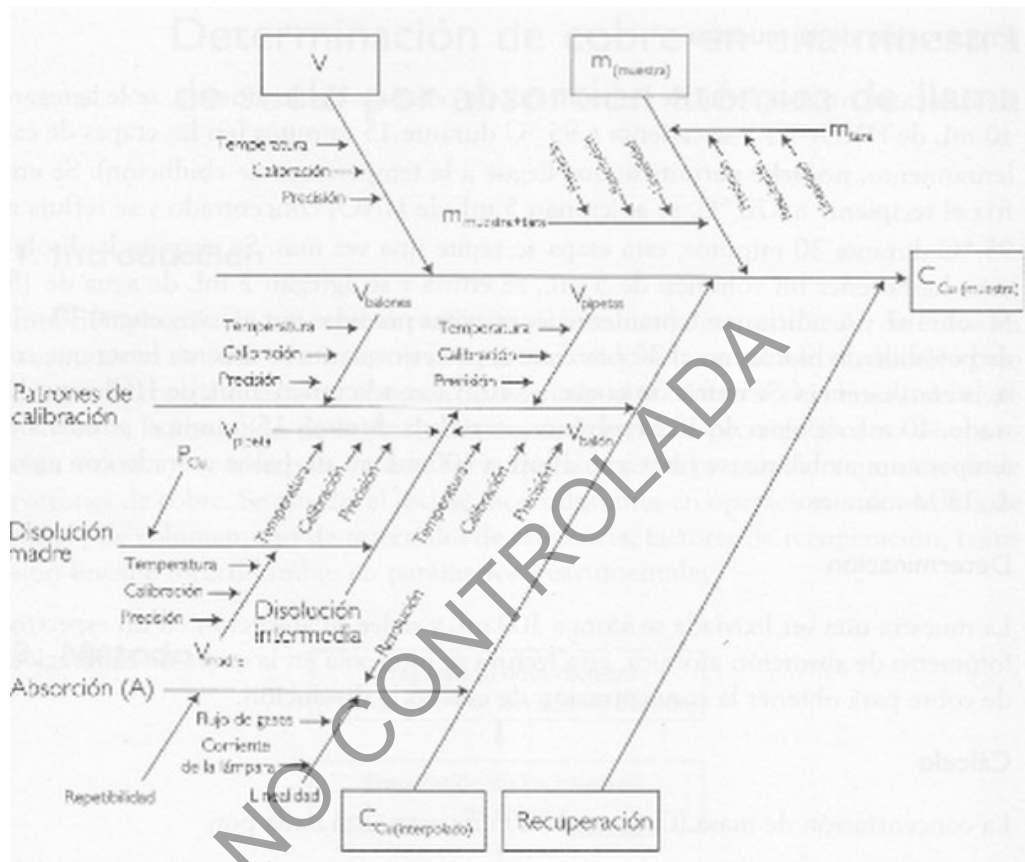
Por ejemplo, para la determinación del contenido de cobre que se ha venido ejemplificando en esta nota, a partir de la siguiente función de medición (expresada de forma que se obtiene la concentración en µg/g):

$$C_{Cu(muestra)} = \frac{C_{Cu(Interpolado)} \cdot V_f \cdot 1000}{m_{muestra}} \quad (\text{Ecuación 7.41})$$

Se puede establecer el siguiente diagrama de Ishikawa "riguroso y completo". El cual considera el enfoque de "abajo hacia arriba", solamente para reconocer las posibles fuentes de variación o variables de entrada o influencia, no solo para la función de medición definida, sino como parte del proceso general de la determinación que se realiza. Es decir, que el diagrama que se presentará a continuación, se usa como base para una simplificación en el siguiente paso de este procedimiento. El diagrama "riguroso y completo" se presenta en la página siguiente.

En este caso, aunque si sería posible evaluar todas las fuentes de incertidumbres representadas en el diagrama (hay aproximadamente 30 fuentes o componentes diferentes en el diagrama, por ejemplo), esto puede resultar tedioso y muy costoso en tiempo.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 52 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	



**Fuente:** Tomado de Chacón, 2011 (Figura IV-a, página 78)

**7.4.4.** Simplifique por evaluación y agrupación las fuentes de variabilidad que pueden encontrarse relacionadas o correlacionadas, de forma que su variabilidad conjunta sea considerada de forma grupal (esto puede realizarse utilizando fuentes de referencia existentes). Indique la relación entre esas fuentes primarias en el diagrama de Ishikawa que fue elaborado en el paso anterior (sea general o específico el diagrama). Cuantifique la variabilidad correspondiente a las componentes simplificadas y agrupadas consideradas. Asocie una distribución de probabilidad a cada una de las fuentes o componentes global que serán consideradas.

**Nota N.º 82:** La primera simplificación, puede implicar la agrupación de términos para alcanzar una expresión de tipo productorio. Por ejemplo, el punto 8.2.7 de *EURACHEM/CITAC* (2012), establece que para una expresión como:

$$f(o, p, q, r) = \frac{(o + p)}{(q + r)} \quad (\text{Ecuación 7,42})$$

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 53 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Debe evaluarse separadamente, primero la combinación de incertidumbre de los sumandos del numerador por un lado, segundo la combinación de incertidumbre de los sumandos del denominador por otro lado, para finalmente, evaluar la combinación de incertidumbres para la función expresada como el producto o relación de factores. Para esta última expresión resulta fácil la combinación o sumatoria de las incertidumbres relativas al cuadrado.

**Nota N.º 83:** Esta forma de estimación, generalmente elimina la necesidad de aplicar coeficientes de correlación entre las fuentes de incertidumbres que se encuentran correlacionadas. Entendiendo por correlación aquellas mediciones que se realizan emparejadas o de forma "simultánea" o concomitante y por lo tanto no son independientes estadísticamente (es parte de la facilidad que tiene este método con respecto al método *GUM* 2008).

**Nota N.º 84:** Ejemplo de la simplificación por agrupación de las fuentes de incertidumbre

Por ejemplo, para la determinación del contenido de cobre que se discutió como ejemplo en la Nota N.º 81, a partir de la siguiente función de medición (expresada de forma que se obtiene la concentración en µg/g):

Sin embargo, con el enfoque que nos interesa, el diagrama se puede establecer para una función de medición (expresada para obtener la concentración en µg/g), tal como la siguiente:

$$C_{Cu(muestra)} = \left( \frac{C_{Cu(Interpolado)} \cdot V_f \cdot 1000}{m_{muestra}} \right)_m \cdot F_T \cdot F_{Rec} \cdot F_{rep} \quad (\text{Ecuación 7.43})$$

Se puede establecer el siguiente diagrama "simplificado por agrupación" de fuentes primarias dentro de algunos de los factores multiplicativos de corrección (con aporte importante en la estimación de incertidumbre). La simplificación por agrupación de variaciones individuales en variaciones globales (ya sea estimadas por validaciones de consistencia interna, análisis estadísticos complejos anidados de variabilidad o de varianza, estudios de suficiencia o colaboración), son los que hacen de este enfoque, un enfoque "globalizado", el cual no está en desacuerdo con el concepto de "incertidumbre global", la cual en el enfoque de la *GUM* 2008 se obtiene como una "incertidumbre expandida" a partir de las componentes primarias. En este enfoque de *EURACHEM/CITAC* la incertidumbre global, aunque luego se estima también una incertidumbre expandida, se refiere a considerar de forma conjunta las principales fuentes de variación en el análisis de influencias de las magnitudes (sean mensurables o solamente conceptualmente de carácter cualitativo).

El diagrama simplificado sería aproximadamente (ver página siguiente):



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 55 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

modelación de fenómenos), siempre que NO se demuestre otra distribución experimentalmente, como por ejemplo distribuciones (ver Anexo Número 05).

b- Tienen distribución rectangular, las mismas fuentes ya establecidas en el inciso "b" de la Nota N.º 14, así como intervalos o rangos establecidos para los sesgos cuando se llevan cartas de control de los mismos, lo cual aplica solamente para cuando el control se lleva al mismo nivel de la determinación.

c- Tienen distribución de *t de Student*, todas las estimaciones que teniendo una distribución normal, presenten un número de grados de libertad menor a 10, en cuyo caso se puede valorar la necesidad de corregir la dispersión experimental, multiplicándola por el correspondiente factor de *t de Student* al 68,27 % y para los grados de libertad respectivos (ver Anexo Número 03).

d- No tienen distribución asignable: las estimaciones de intervalos a partir de promedios cuadráticos o *RMS* (raíz cuadrática media o "*root mean square*"). Esto promedios cuadráticos se elevan al cuadrado para sumarse en la sumatoria de cuadrados correspondiente a la combinación de las componentes de incertidumbre. El valor *RMS*, se considera una incertidumbre estándar absoluta, la cual se puede expresar también en forma relativa. Los grados de libertad son los usuales para una estimación de un promedio.

**7.4.5.** Obtenga la *incertidumbre estándar* representada por  $u(x_i)$ , para cada fuente de acuerdo con la distribución de probabilidad asignada en el paso anterior (o sin distribución asignable). El paso de obtener la *incertidumbre estándar*, como ya se mencionó se denomina como reducción, estandarización o tipificación de las fuentes de incertidumbre.

**Nota N.º 87:** En este caso, se puede obtener la incertidumbre combinada que se busca, es por definición una incertidumbre estándar, que se estima por la fórmula específica que se puede desarrollar a partir de la expresión general denominada Ley de propagación de incertidumbres, cuya expresión particular es la siguiente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{y}{x_i}\right)^2 \cdot u^2(X_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{y}{x_i} \cdot u(X_i)\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i \cdot u(X_i)]^2} \quad (\text{Ecuación 7.15.b.bis})$$

Donde:  $u_c(y)$  es la incertidumbre combinada para la magnitud de interés con valor de  $y$ ; cada  $y/x_i$  representa la respuesta ponderada con respecto a cada argumento de entrada en la función de medición, equivalentes a los valores de  $c_i$ , también denominados coeficientes de sensibilidad de las variables;  $u(X_i)$  es la incertidumbre estándar para cada argumento que aporta componente de incertidumbre en la estimación.

**7.4.6.** Obtenga la *incertidumbre estándar relativa* representada por  $u(x_i)/X_i$ , para cada fuente de acuerdo con la distribución de probabilidad asignada en el paso anterior. La división por la magnitud absoluta correspondiente se denomina como relativización.

**7.4.7.** Estime la incertidumbre combinada relativa total (considerando todas las fuentes o componentes de incertidumbres combinadas agrupadas que sean necesarias), aplicando la siguiente fórmula específica que se desarrolla a partir de:

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 56 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{y}{x_i}\right)^2 \cdot u^2(X_i)} \quad (\text{Ecuación 7.15.b.1})$$

Que se re-arregla para obtener:

$$\frac{u_c(y)}{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{u(X_i)}{x_i}\right]^2} \quad (\text{Ecuación 7.15.b.2})$$

Donde:  $u_c(y)/y$  es la incertidumbre combinada relativa para la magnitud de interés  $Y$ ;  $u(X_i)/x_i$  representan las incertidumbres relativas para cada fuente o componente  $i$ , que se evalúan porque es importante (Nótese, que en esta expresión ya no aparecen los coeficientes de sensibilidad de las variables).

**Nota N.º 88:** A partir de este punto, se puede seguir el procedimiento alternativo detallado en el sub-apartado 7.3, el cual corresponde al cálculo numérico de incertidumbres por el método de Kragten modificado. Se reitera que este método alternativo, se encuentra validado por el trabajo final de aplicación realizado por Castro, R (2016), como parte de la Carrera de Técnico Superior en Gestor de Calidad (ECA-UTN). Para realizar lo anterior, solamente se debe considerar cada factor de corrección (por condiciones ambientales, por procedimiento de muestreo, por aspectos de los materiales de referencia, por parámetros de validación, por sesgo o estudios de repetibilidad, precisión intermedia o reproducibilidad en ensayos de suficiencia o de colaboración), como unitario, con la correspondiente desviación absoluta estimada por la incertidumbre estándar cuantificada de forma relativa (ya sea como fracción o como porcentaje, pero utilizada en fracción unitaria).

**Nota N.º 89:** La fórmula general de la Ley de propagación de incertidumbres que se presentó en la Nota N.º 16, cuando no se incluyen las correlaciones (ver Nota N.º 83) y expresada para una función simplificada como productorio (ver Nota N.º 82), se convierte en una sencilla suma de incertidumbres relativas de todos los componentes. Además, reconózcase que para obtener la incertidumbre absoluta del mensurando, solamente es necesario re-arreglar nuevamente la ecuación 7.15.b.1, para obtener:

$$u_c(y) = y \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{u(X_i)}{x_i}\right]^2} \quad (\text{Ecuación 7.15.b.3})$$

Es por lo anterior, que en algunas ocasiones, en las referencias se utiliza el concepto de coeficientes de variación (CV, los cuales son incertidumbres relativas expresadas en porcentaje y no en fracción unitaria, lo que implica que debe tenerse el cuidado de ser consistente en las sumatorias, o todos en fracción unitaria o todos en porcentaje).

**Nota N.º 90:** La incertidumbre combinada relativa (por definición es una incertidumbre estándar relativa). Para una justificación parcial, de la Ley de propagación de incertidumbres, ver apartado A3.2 Ley aditiva de la varianza y su relación con la incertidumbre combinada, en el Anexo Número 03.



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 57 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**7.4.8.** Valore la importancia de cada uno de los componentes sobre las incertidumbres combinadas, para detectar las incertidumbres relevantes y las incertidumbres no significantes. Esto puede llevar a re-evaluar la estimación realizada.

**Nota N.º 91:** Para realizar lo anterior, es necesario que se refiera a todos los puntos 9.1, 9.2 y 9.3 (en este caso solamente no aplica nada de lo establecido en el punto 9.2.1); para entonces regresar a este punto del procedimiento y continuar con los pasos faltantes, relacionados con la estimación de una incertidumbre expandida.

**7.4.9.** Elija la probabilidad de cobertura ( $p$ ) expresada como fracción unitaria (este valor se puede expresar como porcentaje equivalente, pero en los cálculos siempre se utiliza como fracción unitaria). Ver nuevamente la Nota N.º 23, antes de regresar a este punto.

**7.4.10.** Verifique el cumplimiento del Teorema del Límite Central, antes de calcular la incertidumbre expandida (el factor de cobertura depende de la distribución final resultante). Esto significa evaluar el peso, ponderación o la importancia de cada una de las componentes en la combinación que se realiza para la estimación. Ver nuevamente las Notas N.º 24 y 25, antes de regresar a este punto.

**7.4.10.1.** Evalúe la combinación o convolución de las fuentes consideradas, para definir el factor de cobertura ( $k$ ) para la estimación de la incertidumbre expandida. La obtención del factor de cobertura está relacionada con el cumplimiento del Teorema del Límite Central.

En la práctica general para este enfoque de estimación, solo existen dos casos principalmente, que pueden surgir en la evaluación del cumplimiento del Teorema del Límite Central (en ambos casos, ver las partes correspondientes del apartado A3.4, Factores de cobertura para las distribuciones predominantes más comunes, en el Anexo Número 03):

- Caso I: La distribución resultante es normal porque los grados de libertad son elevados o mayores a 10. Se utiliza la distribución normal estándar para determinación del factor de cobertura ( $k$ ) de acuerdo con la probabilidad de cobertura previamente definido ( $p$ ). Por ejemplo  $z(0,950\ 0) = 1,96$  ó  $z(0,954\ 5) = 2,00$ , u otro particular para la probabilidad a la que se desea realizar la estimación de la incertidumbre expandida, el cual debe obtenerse de las tablas de valores de  $z$ . El factor de cobertura para la estimación de la incertidumbre expandida, se calcula como el valor de la variable normal estándar para la probabilidad de cobertura  $p$  elegida y es independiente de los grados de libertad de la estimación. Para esto se utiliza:

$$k = z(p) \quad (\text{Ecuación 7.22.bis})$$

- Caso II: La distribución resultante es normal pero la contribución de la componente de incertidumbre de mayor importancia implica que los grados de libertad son menores de 10. En este caso es necesario la cuantificación de los grados de libertad para todas las fuentes (ver punto 9.3.2), el cálculo de los números de grados de libertad totales ( $\nu_T$ , los cuales se redondean siempre al entero menor) calculados con la fórmula de Welch-Satterthwaite. Como se establece en el punto 9.3.2, para este caso el factor de cobertura para la estimación de la incertidumbre expandida, es el valor de  $t$  de Student para la probabilidad de cobertura  $p$  previamente elegida y con los grados de libertad totales ( $\nu_T$ ) calculados en la estimación. Para esto se utiliza:

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 58 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

$$k = t(v_T, p) \quad (\text{Ecuación 7.23.bis})$$

**Nota N°. 92:** Como se puede apreciar, en ambos casos el valor del factor de cobertura  $k$ , depende del valor de la probabilidad de cobertura  $p$ . En el caso de la distribución de  $t$  de Student, además depende de los grados de libertad.

**7.4.10.2.** Estime la incertidumbre expandida, la cual en todos los casos está dada por:

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \quad (\text{Ecuación 7.28.bis})$$

Donde  $u_c(y)$  se obtiene a partir de la ecuación 7.15.b.3 de la Nota N°. 89.

**7.4.11.** Elabore el informe de resultado de la medición (ver los formatos aceptados en el punto 10.1). Las incertidumbres combinadas o expandidas se expresan finalmente, con una o dos cifras significativas, de forma que no se incurra en errores por redondeo relativos, mayores a un 5 %. Ver nuevamente la Nota N.º 28, antes de regresar a este punto.

**7.4.12.** Elabore el presupuesto de incertidumbres como resumen general (ver los cuadros de ejemplos en el Anexo Número 05) y complete el Formulario de Presupuesto de incertidumbres (ver ejemplo del formulario en el mismo Anexo Número 05). Ver de nuevo Nota N.º 29.

## 8 Criterios de Aceptación o Rechazo de Resultados:

Los criterios de aceptación y rechazo, dependerán de la metodología particular para la determinación de un mensurando y de sus magnitudes de influencia, así como de la calidad y la utilidad del resultado obtenido, especialmente cuando es necesario compararlo contra los límites de aceptación legales o reglamentarios que correspondan. Todas las correcciones que se detallan aplican para las estimaciones de "abajo hacia arriba" (procedimiento GUM 2008). Las estimaciones de "arriba hacia abajo", generalmente corresponden a sobre-estimaciones no recomendadas por la GUM, pero aceptadas por una parte de la comunidad científica por su practicidad (incluso por la guía de EURACHEM 2008, la política de ANAB y la literatura especializada), especialmente para las determinaciones complejas realizadas en el análisis químico de componentes particulares en matrices complejas.

### 8.1 Posibles correcciones post-estimación preliminar

No.	Criterio de Aceptación	Valor Límite	Corrección Aplicable
8.1.1	No predominan en la estimación fuentes de tipo B, cuando hay varias componentes en la estimación.	Hasta un máximo de 33.33% de valor IFI para la fuente de tipo B predominante.	Se puede mejorar la estimación utilizando instrumental de mejores características metrológicas si la determinación lo requiere.
8.1.2	No predomina en la estimación una fuente debida a repetibilidad cuando hay menos de 10 grados de libertad.	Hasta un máximo de 33,33% de valor IFI para la fuente debida a repetibilidad.	Se puede corregir el aporte de esa fuente, antes de la combinación por ampliación de la incertidumbre estándar, utilizando el factor de cobertura para $t$ de Student al 68,27%, si la determinación lo

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 59 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

			requiere.
<b>8.1.3</b>	No existe en la estimación una fuente excesivamente predominante.	Hasta un máximo de 50,00% de valor IFI para la fuente excesivamente predominante.	Se puede mejorar la estimación, por la optimización de la variabilidad de esa fuente, buscando la misma preponderancia entre esta y las demás componentes de segunda importancia si la determinación lo requiere.
<b>8.1.4</b>	El factor de cobertura en función de la probabilidad de cobertura es el adecuado.	Hasta un mínimo de 95,45% en la probabilidad de cobertura.	No se aceptan probabilidades de cobertura menores al valor límite, aunque se pueden utilizar valores mayores en función de la aplicación del resultado.

**Nota N°. 93:** Cuando un resultado presente una fuente de incertidumbre predominante y esto represente una calidad inadecuada en la medición (de acuerdo con las consideraciones de **9.2** y **9.3**), debe buscarse la manera de disminuir esta fuente, ya sea calibrando el instrumento, adquiriendo un mejor material de referencia, utilizando un mejor instrumento, realizando un mejor control de condiciones ambientales, etc., según sea el caso.

## 8.2 Otras correcciones posibles que se pueden aplicar en futuras estimaciones

Cuando la incertidumbre predominante es la repetibilidad (incertidumbre de tipo A), se puede disminuir su significancia, realizando un mayor número de determinaciones bajo condiciones de repetibilidad (esto no siempre es posible y puede resultar en alto costo en recursos y tiempo).

- En el caso de combinaciones lineales de incertidumbre, una forma de estimar el número de réplicas necesarias para obtener una incertidumbre expandida (o combinada) objetivo es:

$$n = \frac{s^2(y)}{\frac{U^2(y)}{k^2} - \sum u_{i,B}^2} \quad (\text{Ecuación 8.1})$$

Donde  $s(y)$  es la estimación de la desviación estándar del proceso de medición (conocido por la experiencia en la determinación previa),  $U(y)$  es la incertidumbre expandida con la calidad deseada o incertidumbre expandida objetivo,  $k$  es el factor de cobertura para la probabilidad deseada,  $u_{i,B}$  son todas las fuentes de incertidumbres tipo B (cuando las correlaciones de cualquier tipo no son predominantes) y la condición mínima es que  $n$  sea mayor que 2.

- En el caso de combinaciones no lineales de incertidumbre, se deben incluir los coeficientes de sensibilidad en la fórmula. El número de réplicas necesarias para obtener una incertidumbre expandida (o combinada) objetivo es:

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 60 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

$$n = \frac{c_{Rep}^2 \cdot s^2(y)}{\frac{U^2(y)}{k^2} - \sum (c_{i,B}^2 \cdot u_{i,B}^2)} \quad (\text{Ecuación 8.2})$$

Donde  $s(y)$  es la estimación de la desviación estándar del proceso de medición (conocido por la experiencia en la determinación previa) y  $c_{Rep}$  su coeficiente de sensibilidad de la repetibilidad,  $U(y)$  es la incertidumbre expandida con la calidad deseada o incertidumbre expandida objetivo,  $k$  es el factor de cobertura para la probabilidad deseada,  $u_{i,B}$  son todas las fuentes de incertidumbres tipo B y  $c_{i,B}$  sus coeficientes de sensibilidad (cuando las correlaciones de cualquier tipo no son predominantes). Nuevamente la condición mínima es que  $n$  sea mayor que 2. No se presentan ecuaciones para determinar el número de replicados para cuando son predominantes las correlaciones diferentes a las correlaciones de ajustes lineales.

## 9 Cálculos y evaluación de la incertidumbre:

### 9.1 Cálculo de la Importancia de la Fuente de Interés (IFI)

Para evaluar la importancia o significancia de cada fuente de incertidumbre, calcule la incertidumbre combinada al cuadrado, pero sin considerar la componente que se evalúa, al cálculo se le denominará incertidumbre combinada sesgada al cuadrado,  $u_s^2(y)$ . Calcule la varianza porcentual de representación de las demás (se denominará como Importancia de las demás), como el cociente entre la incertidumbre combinada sesgada al cuadrado y la incertidumbre combinada al cuadrado, pero expresado en porcentaje, es decir:

$$V.P.(demás) = \text{Importancia de las demás} = [ u_s^2(y) / u_c^2(y) ] \cdot 100 \% \quad (\text{Ecuación 9.1})$$

Se debe considerar en la fórmula anterior, que  $u_c^2(y)$  puede corresponder a una incertidumbre imaginaria (cuando hay componentes negativas que aportan en la estimación), considerando todas las componentes como positivas (ver pasos 7.3.15.5 a 7.3.15.7 del procedimiento de cálculo numérico y las notas desarrolladas como ejemplo).

Una vez realizado lo anterior, calcule la varianza porcentual de cada componente (se denominará como Importancia de la Fuente de Interés, simbolizada como IFI). Para esto, se utiliza la siguiente ecuación:

$$IFI = \text{Importancia de la fuente de interés} = 100 \% - \text{Importancia de las demás} \quad (\text{Ecuación 9.2})$$

Para valorar estos resultados, use al expresar el valor de IFI de cada fuente, dos cifras decimales para fuentes con importancia iguales o mayores a 10,00%; tres cifras decimales para fuentes con importancia menores a 10,00 % y hasta 1,000 %; y utilice cuatro cifras decimales solamente para fuentes menores a 1,0000 % en importancia. La fuente en evaluación o de interés es poco importante, si las demás representan más de un 90 % (en cuyo caso la fuente evaluada representa menos de un 10 %).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 61 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**Nota N.º 94:** Existen otros métodos para valorar cualitativamente la contribución de los componentes a la incertidumbre combinada, por ejemplo se pueden utilizar gráficos de barras, gráficas de círculos o pictogramas, para representar visual y gráficamente la importancia o predominio de las componentes para varias incertidumbres combinadas intermedias y la importancia de cada fuente primaria sobre la incertidumbre combinada final.

**Nota N.º 95:** Por ejemplo, en la elaboración de un diagrama de Ishikawa final, o de otros diagramas equivalentes (tal como el diagrama de árbol), para mostrar la importancia de las fuentes o componentes, se pueden utilizar las características propias de los pictogramas, en los que se utiliza el tamaño de las figuras geométricas de representación, para resaltar las fuentes de mayor importancia con un mayor tamaño de los elementos gráficos o las figuras geométricas que le corresponden en la representación.

## 9.2 Evaluación de la Importancia de la Fuente de Interés (IFI)

**9.2.1** La "Importancia de la fuente de interés" (valor *IFI*, el complemento de la "Importancia de las demás"), está directamente relacionada con el parámetro denominado varianza porcentual (*V.P.*) de la fuente. Desde un punto de vista aproximado, al cociente obtenido por la relación o razón dada por  $100\%/V.P.$ ; se le puede relacionar con la relación señal/ruido de la fuente (*S/N*, entendiendo por "ruido" la propia "incertidumbre" de la estimación de esa fuente de incertidumbre). Se discutirán tres casos relevantes de entre las múltiples posibilidades que se pueden encontrar:

- Si se tienen 10 fuentes que contribuyen equitativamente en importancia o *V.P.* de 10,00% cada una, el cociente da una relación señal/ruido de 10 para cada fuente, por lo que su efecto como incertidumbres está optimizado y se está en el extremo de óptimo de incertidumbres, pero no se puede despreciar ninguna. Este es el extremo de mejor calidad en la estimación de la incertidumbre (cuando todas las fuentes consideradas tienen la misma importancia).
- En la parte media, cuando hay una fuente predominante cuya importancia o *V.P.* es de 33,33%, el cociente señal/ruido (*S/N*) da como resultado un valor de 3 para esa fuente, el cual se considera el límite riguroso mínimo óptimo para el cociente, la importancia ideal máxima es entonces de 33,33% para la fuente de incertidumbre predominante (es por esto que cuando haya una predominante, que no sobrepase un 33,33% de importancia, se pueden despreciar los efectos de las contribuciones de importancia menor al 10,00%, porque la que limita el "ruido" de fondo en la estimación es la fuente o componente predominante). Este es el punto medio de la calidad en la estimación de la incertidumbre (cuando una fuente predominante ya tiene un valor límite riguroso mínimo de relación señal/ruido o *S/N*).
- En el extremo opuesto al primer inciso, una componente de incertidumbre que predomina con al menos o más del %50,00 de importancia o *V.P.*, implica un valor para el cociente de la relación señal/ruido igual o menor a 2 (el límite mínimo no riguroso). Esto significa que la estimación de la incertidumbre no puede ser aceptable o lo que es lo mismo, que su calidad no es adecuada por el exceso de "ruido" de fondo en la estimación. Este corresponde el extremo no deseado de la estimación de incertidumbre (cuando una fuente predominante ya ni siquiera cumple con el límite mínimo aceptable de relación *S/N*).

Debido a lo anterior, cuando se tenga una fuente de incertidumbre predominante, con una P-DCFGCG-JEF-001-R2, Versión 01  
Emitido y Aprobado por Unidad de Gestión de Calidad

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 62 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

importancia mayor a 33,33 %, para refinar la calidad de la estimación, se hace necesario tomar acciones para disminuir su importancia, es decir tratar de alcanzar la igual preponderancia de otras fuentes, pero no aumentando la importancia de las otras fuentes, sino disminuyendo la importancia de la fuente predominante, hasta que al menos haya tres fuentes con una importancia aproximada del 30 %. Realizar lo anterior, lleva a una calidad óptima en el análisis de estimación de incertidumbre, pero realizar esfuerzos adicionales puede significar gasto innecesario de trabajo y recursos.

**9.2.2** La política de estimación de incertidumbres de ANAB requiere que se identifiquen "todos los factores que podrían contribuir más del 10% al total de la IM (Incertidumbre de Medida) y se deben tener en cuenta en el cálculo". Esto significa indirectamente, que se pueden despreciar las componentes que aporten menos del 10% (en valor IFI, esto puede representar entre un 19%-21%), en concordancia también con el estudio realizado por Castro (en el cual también se realizó la validación del procedimiento de cálculo numérico detallado en el apartado 7.3 de este PON). En ese estudio, se determinó que se permite despreciar fuentes o componentes de incertidumbre de IFI de hasta 15%. Esto significa despreciar fuentes con menos de un 10%, pero sobre la base de la magnitud de la incertidumbre estándar estimada para esa fuente, sin demérito de la estimación que se realiza. Eso sí, siempre que las fuentes no correspondan a componentes debidas limitaciones instrumentales, que la contribución disminuida se debe su coeficiente de sensibilidad en la función de medición como valor de ponderación de la componente en discusión y que la combinación no se obtenga de varias componentes con importancias muy similares (en el caso de que sean muchas las fuentes). En el último caso, no se debe despreciar ninguna componente.

**9.2.3** Además, tanto la política de ANAB como la política del ECA, establecen la necesidad de verificar la estimación realizada.

Por ejemplo, ANAB establece en su política:

"Aunque el cálculo de la IM se puede llevar a cabo mediante métodos directos o indirectos, es necesario identificar todos los factores que podrían contribuir más del 10% al total de la IM y se deben tener en cuenta en el cálculo. Es necesario utilizar presupuestos de incertidumbre para las calibraciones. Independientemente del método y dentro de lo posible, la IM estimada se debe confirmar mediante medidas directas." (ANAB, 2015)

Por ejemplo, la política del ECA, indica que se "*deben mantener evidencia documentada que soporte sus declaraciones de incertidumbre*" (ECA-MC-PO02, 2014, p. 9). Para esto último, según el punto 7.7 de esa Política del ECA, se debe incluir (2014, p. 9):

"(...)

a. Memoria de cálculo.

b. Datos

c. Procedimiento de estimación de la incertidumbre.

d. Demostración de la validez de los resultados de estimación de la incertidumbre."

Aunque no se indican aspectos particulares en detalle, tanto para el caso de ANAB en el que no se establece como "se debe confirmar mediante medidas directas" la incertidumbre de medida estimada, como para el caso del ECA en el que no se establece como se realiza el último inciso "d" de la cita anterior, se interpreta de acuerdo con la normativa, que la "*demostración de validez de los resultados*" implica el aporte de evidencia objetiva y por lo tanto documental,

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 63 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

específicamente con relación a que se haya verificado la naturaleza real de la estimación de incertidumbre realizada.

### 9.3. Casos especiales, de acuerdo con la Importancia de la Fuente de Interés (IFI)

**9.3.1.** Cuando al evaluar la importancia de las componentes, la incertidumbre predominante sea asignada a una fuente con distribución de Tipo B, se debe realizar una evaluación de la incertidumbre estimada, para determinar si es posible mejorar la estimación realizada, en función de que la principal limitación de la estimación posiblemente es de carácter meramente instrumental.

**9.3.2.** Cuando al evaluar la importancia para una fuente debida a la repetibilidad, se obtenga que las demás representan menos de un 66,66 % (esto significa que la importancia o *V.P.* de la repetibilidad representa más de un 33,33 %, con las implicaciones en el cociente de la relación señal/ruido en el límite ya discutidas en el punto anterior), es necesario corregir la incertidumbre estándar de esa fuente, multiplicándola por el factor de *t de Student* (si los grados de libertad son menores a 10, ver valores de  $t_{68,27\%}$  en Cuadro I-A2 del Anexo Número 02). Además, en todos los casos es necesario calcular el número de grados de libertad efectivos con la fórmula de Welch-Satterthwaite (CUIDADO: con esta ecuación debe tenerse presente utilizar la potencia correcta a la cuatro y no al cuadrado, lo cual es el error más común al aplicarla).

Para combinaciones de funciones lineales simples de fuentes de incertidumbre (parciales), esta ecuación es:

$$v_{efectivos} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{u^4(x_i)}{v_i} \right]} \quad (\text{Ecuación 9.3})$$

Para combinaciones de funciones no lineales de fuentes de incertidumbre en una estimación final, esta ecuación es:

$$v_T = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{u_i^4(y)}{v_{i,efectivos}} \right]} \quad (\text{Ecuación 9.4})$$

Donde  $u_i(y)$  representa la contribución de la fuente de incertidumbre sobre la incertidumbre combinada del numerador. Esto significa el producto entre el coeficiente de sensibilidad y la estimación de la incertidumbre estándar del argumento correspondiente, es decir  $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$ .

**Nota N°. 96:** Cuando lo anterior se realiza para la incertidumbre combinada de una fuente primaria de incertidumbre a partir de fuentes secundarias, el valor de  $v_{efectivos}$  se puede utilizar con dos decimales en los cálculos subsecuentes. Cuando lo anterior se realiza sobre la incertidumbre combinada del mensurando final, el valor de  $v_T$  obtenido se debe redondear al entero menor más cercano (para que el factor de cobertura sea el mayor posible).

**Nota N°. 97:** Con los grados de libertad estimados y la probabilidad de cobertura deseada, se

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 64 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

obtiene el factor de cobertura, que en este caso es el valor de *t de Student* (ver Cuadro I-A3, del Anexo Número 03), es decir:

$$k = t(v_T, p) \quad (\text{Ecuación 7.23.bis})$$

Donde  $v_T$ , es el valor calculado con la fórmula de Welch-Satterthwaite (finalmente como número redondeado al entero menor). Para el caso de un valor elevado en los grados de libertad, el valor del factor de cobertura tenderá al valor de la variable normal estándar ( $z$ ), el cual es igual a 2,00 para un 95,45% de confianza o 1,96 para un 95,00% de confianza.

**Nota N.º 98:** En cualquiera de los casos, para aplicar la ecuación de Welch-Satterthwaite, se puede considerar que las incertidumbres de tipo B tomadas de certificados de calibración tienen como mínimo 50 grados de libertad, que para incertidumbres de tipo B con distribuciones rectangulares, triangulares o trapezoidales, cuando no se especifican los grados de libertad, estos se pueden considerar infinitos o al menos muy grandes (con una contribución de cero en la sumatoria del denominador de la ecuación de Welch-Satterthwaite). Los grados de libertad de incertidumbres de tipo A son las establecidas usualmente,  $n - 1$  para promedios y  $k - 2$  para parámetros de ajustes lineales (pendiente e intercepto).

**9.3.4.** Cuando la estimación de incertidumbre corresponde a una estimación del tipo de "arriba hacia abajo", en el que todas las variaciones importantes se engloban en valores de repetibilidad o reproducibilidad generales, NO aplican las consideraciones de relación *S/N* establecidas en el punto 9.1. Esto porque aunque la importancia de estas fuentes generales sea predominante, no corresponden solamente a una fuente o componente primaria, sino a la suma combinada de todas las fuentes de variación expresándose conjuntamente.

## 10 Reporte de Análisis y Resultados:

**10.1** Registre el resumen de la estimación de incertidumbre y el informe de resultado en el Formulario para "Presupuesto de Incertidumbres". El informe de resultado debe respetar cualquiera de los siguientes formatos:

$$Y = [ y_m \pm U(y) ] \text{ unidades} \quad (k = \text{valor}, p = \text{valor}, \text{tipo de distribución})$$

(Ecuación 10.1)

$$Y = y_m \text{ unidades} \pm U(y) \text{ unidades} \quad (k = \text{valor}, p = \text{valor}, \text{tipo de distribución})$$

(Ecuación 10.2)

Donde,  $y_m$  es el valor promedio (o el valor de una medición única),  $U$  es la incertidumbre expandida y  $p$  la probabilidad de cobertura. Además,  $U$  debe reportarse como máximo con dos cifras significativas a menos que exista una justificación documentada para informar dígitos significativos adicionales. El número de cifras elegido, determina el número de cifras en el valor del mensurando " $\bar{y}$ " o " $y_m$ " definido (el número de cifras totales del valor del mensurando tiene que coincidir con las dos cifras significativas de la incertidumbre. Se recuerda, que en el acotamiento de las cifras, no se puede cometer más de 5% de error relativo por redondeo de acuerdo a lo discutido en la Nota N.º 28, que se reproduce para fácil referencia en la siguiente Nota N.º 99.

Para los casos en que se reporte la incertidumbre en el dictamen pericial se debe tomar en cuenta lo indicado anteriormente en cuanto a la forma de reportar (factor de cobertura,



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 65 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

formato y  $\pm U$  y dígitos significativos). También la incertidumbre debe ser reportada al mismo nivel de significancia que el resultado de la medición.

**Nota N.º 99:** Consideraciones adicionales en relación al informe de resultados:

a- Si en la estimación de la incertidumbre combinada se obtiene el valor de 0,531 unidades arbitrarias, se puede expresar la incertidumbre como 0,53 unidades arbitrarias y no se puede expresar como 0,5 unidades arbitrarias (ya que en el primer caso el error relativo por redondeo es menor a 5% y en el segundo caso, el error relativo por redondeo es mayor a 5 %).

b- Si en la estimación de la incertidumbre combinada se obtiene el valor de 0,511 unidades arbitrarias, se puede expresar la incertidumbre ya sea como 0,51 unidades arbitrarias o ya sea como 0,5 unidades arbitrarias (en ambos casos el error relativo por redondeo es menor a 5 %, por lo que ambas expresiones se pueden utilizar).

**10.2** Cuando lo anterior no se pueda realizar porque por las particularidades de la medición, no todas las fuentes de incertidumbre se puedan cuantificar, como mínimo debe documentarse, ya sea el listado de las fuentes de incertidumbre (en acuerdo con la Norma INTE ISO-IEC 17025: 2017), o ya sea el diagrama de Ishikawa (o el diagrama de árbol equivalente); en todos los casos incluyendo todas las fuentes o componentes de incertidumbre, que por experiencia en la aplicación de la metodología o la aplicación del procedimiento particular de ensayo, se espera tengan una influencia importante en la medición particular (para esto se puede aportar una revisión bibliográfica que sustente la importancia de las componentes consideradas y las no consideradas).

**10.3** Los formularios generados con este procedimiento (o sus equivalentes digitales), una vez completados con los registros correspondientes, se convierten en la evidencia objetiva documental, solicitada en las políticas de los entes de acreditación. Los formularios que se deben completar, para registrar internamente la estimación, son los Formularios de control de condiciones ambientales o de otras magnitudes de influencia, cuando sean necesarios (Formulario de Registro por Rango de Condiciones de Temperatura y Humedad Relativa y Formulario Puntual de Condiciones de Temperatura y Humedad Relativa) y el Formulario Presupuesto de Incertidumbres para registrar e informar por medio de un resumen de resultados, la incertidumbre combinada y sus componentes, en el caso de los procedimientos según los apartados 7.2, 7.3 y 7.4.

## 11 Medidas de Seguridad y Salud Ocupacional:

N/A

## 12 Simbología:

*a*: semi-intervalo en muchas de las distribuciones de incertidumbres tipo B.

$\alpha$ : ángulo de inclinación de la pendiente en uno de los ejemplos, coeficiente de expansión volumétrica del agua en otro de los ejemplos.

*A*: base menor de una distribución trapezoidal, absorbancia, área de picos cromatográficos y área relativa en otro de los ejemplos.

*ANAB*: ANSI / ASQ National Accreditation Board.

*ANOVA*: análisis de varianza (*Analisis Of Variance*).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 66 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

*ANSI: American National Standards Institute.*

*Ap:* Apreciación del observador, también puede denominarse factor de corrección por apreciación del observador para el valor de escala analógico (este puede ser 1, 1/2, 1/4 o 1/5 visualmente y con amplificadores ópticos 1/10, 1/20, 1/50 o inferior).

*ASQ: American Society for Quality.*

*b:* intercepto y valor del intercepto de ajustes de regresión lineal.

*$\beta$ :* parámetro de una distribución trapezoidal, obtenido como el cociente  $A/B$ .

*B:* base mayor (real o amplitud) de una distribución trapezoidal.

*BIPM:* Oficina Internacional de Pesas y Medidas.

*$c_i$ :* coeficiente de sensibilidad, también representado por  $\partial f/\partial X_i$  o por  $c_i(Y)$ .

*C:* corrección sobre una indicación instrumental o resultado de medición, concentración en algunos de los ejemplos.

*CITAC: Co-Operation on International Traceability in Analytical Chemistry.*

*$C_n$ :* concentración molar de una disolución en uno de los ejemplos.

*C.N.:* Corrección Nula, no aplicación de una corrección por insignificancia con respecto a incertidumbre.

*$C_{\text{ETOH}}$ :* concentración de etanol en uno de los ejemplos.

*$cor(m,b)$ :* coeficiente de correlación entre la pendiente ( $m$ ) y el intercepto en un ajuste de calibración lineal.

*cov:* covarianza entre dos o más variables aleatorias correlacionadas, "simultáneas" o concomitantes.

*$C_x$ :* concentración de un analito cualquiera en uno de los ejemplos.

*$d$ :* división de escala instrumental (también se utiliza  $V_d$ , valor de división de escala en el ejemplo de la medida de una marca de frenado, para no duplicar la notación), indicación de una cinta métrica en la medida de una marca de frenado en el ejemplo mencionado.

*$D$ :* deriva histórica de la respuesta de un instrumento, longitud de una marca de frenado en uno de los ejemplos.

*DAD:* Dispositivo de Arreglo de Diodos en uno de los ejemplos.

*DCF:* Departamento de Ciencias Forenses.

*DTS:* Borrador de Norma técnica, en proceso de elaboración ("Draft Technical Standard").

*E:* error en una indicación instrumental o resultado de medición, energía en uno de los ejemplos.

*ECA:* Ente Costarricense de Acreditación.

*EMP:* Error Máximo Permitido, puede relacionarse con una tolerancia instrumental.

*$f$ :* operador de función matemática, con los argumentos de entrada entre paréntesis.

*$F$ :* valor de estadístico de Snedecor para distribución de variable  $F$  de Fisher, fuerza en uno de los ejemplos.

*$f_c$ :* factor de corrección por multiplicación.

*$F_c$ :* Factor de corrección por multiplicación.

*FID:* Detector de Ionización de Llama en uno de los ejemplos.

*$g$ :* aceleración debida a la gravedad en uno de los ejemplos

*GC:* Cromatografía de Gases en uno de los ejemplos.

*GL:* Grados de libertad.

*GUM:* Guide to the expression of Uncertainty in Measurement.

*HS:* Espacio de Cabeza (*Head Space*) en uno de los ejemplos.

*ICP:* Plasma Acoplado por Inducción en uno de los ejemplos.

*IEC:* Comisión Electrotécnica Internacional.

*IFCC:* Federación Internacional de Química Clínica y Medicina de Laboratorio.

*ILAC:* Cooperación Internacional de Acreditación de Laboratorios.

*INTE:* INTECO, Instituto de Normalización Costarricense

*IUPAC:* Organización Internacional de Química Pura y Aplicada.

P-DCFGCG-JEF-001-R2, Versión 01

Emitido y Aprobado por Unidad de Gestión de Calidad

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 67 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

*IUPAP*: Organización Internacional de Física Pura y Aplicada.

*ISO*: Organización Internacional de Normalización.

*ISTD*: estándar interno en una determinación para normalizar la variabilidad en uno de los ejemplos.

*j*: número de niveles diferentes en ajustes de regresión lineal.

*JCGM*: Comité Conjunto de Guías en Metrología.

*k*: factor de cobertura.

*LED*: diodo emisor de luz.

*LSD*: último dígito significativo en uno de los ejemplos.

*m*: pendiente y valor de pendiente de ajustes de regresión lineal en algunos de los ejemplos.

$\mu$ : valor verdadero o valor convencionalmente verdadero, coeficiente de fricción con la superficie de rodamiento en uno de los ejemplos.

*MC*: manual de calidad en código del ECA.

*n*: número de réplicas en una muestra.

*v*: grados de libertad,  $n - 1$  en promedios aritméticos y  $j - 2$  en parámetros de ajuste lineal, también representado por el GL.

*v<sub>efec</sub>*: grados de libertad efectivos, calculado con la fórmula de Welch-Satterthwaite.

*v<sub>T</sub>*: grados de libertad totales para el mensurando final (menor entero, calculado con la fórmula de Welch-Satterthwaite).

*N*: número de magnitudes de entrada en el argumento de funciones implícitas o explícitas.

*N/A*: No Aplica.

*OES*: Espectrometría Óptica de Emisión en uno de los ejemplos.

*OIML*: Organización Internacional de Metrología Legal.

*OQ*: Cualificación Operacional en uno de los ejemplos.

*p*: probabilidad de cobertura o nivel de cobertura.

*P*: pureza o factor de corrección por la pureza para el material de referencia certificado en uno de los ejemplos.

*PM*: masa molar de una sustancia en uno de los ejemplos.

*PON*: Procedimiento de Operación Normado.

*PV*: Verificación de Desempeño en uno de los ejemplos.

*r*: repetibilidad, factor de correlación entre dos o más variables correlacionadas.

*R*: reproducibilidad, resolución instrumental (escala digital), en algunas ocasiones es equivalente a *d* (escala analógica), o equivalente a *Vd* (valor de división de escala analógica en uno de los ejemplos), repetibilidad en uno de los ejemplos.

*RMS*: raíz cuadrática media, promedio cuadrático de un conjunto de términos aleatorios, elevados al cuadrado, sumados y operados con la raíz cuadrada.

*r(m,b)*: coeficiente de correlación entre la pendiente (*m*) y el intercepto en un ajuste de calibración lineal.

*s<sub>comb</sub>*: desviación estándar combinada o histórica obtenidas en validación de metodologías (generalmente obtenida a partir de la varianza ponderada por los grados de libertad).

*s<sub>x(m)</sub>*: desviación estándar de la media o del promedio, también representada por *s<sub>m</sub>* (aunque este último también representa la dispersión de la pendiente en algunos ejemplos).

*s<sub>x</sub>*: desviación estándar de una muestra, o desviación estándar de cualquier muestra de la variable *x*.

*s(y)*: desviación estándar de una muestra del mensurando o la variable *y*.

$\sigma$ : desviación estándar de la población para cualquier distribución de probabilidad, por lo tanto incertidumbre estándar.

*SI*: Sistema Internacional (de Unidades).

*SCD*: Solicitud de Cambio Documental.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 68 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

SGC: Sistema de Gestión de Calidad.

$S/N$ : relación o cociente de señal/ruido (*Signal/Noise*).

$t$ : valor de *t de Student*.

*Tipo A*: Método de evaluación de incertidumbre obtenida por análisis estadístico.

*Tipo B*: Método de evaluación de incertidumbre obtenida por asignación de distribución estimada por experiencia.

*Tol*: tolerancia en la respuesta instrumental, en el valor nominal de un equipo o de un patrón

$u$ : incertidumbre estándar de cualquier distribución.

$u_c(y)$ : incertidumbre combinada para el mensurando, por definición es incertidumbre estándar.

$u_i(y)$ : contribución de una componente o fuente a la sumatoria de la incertidumbre combinada, esta magnitud representa al producto del coeficiente de sensibilidad y la incertidumbre estándar de esa componente.

"U": Distribución de probabilidad en forma de la letra "U".

UGC: Unidad de Gestión de Calidad.

$U(y)$ : incertidumbre expandida, es obtenida por el producto  $k \cdot u_c(y)$ .

UV-Vis: Ultravioleta-Visible en uno de los ejemplos.

$V$ : Varianza, volúmenes de una disolución o de una preparación en algunos de los ejemplos, velocidad de un vehículo en dos de los ejemplos.

$V_d$ : Valor de división de escala en uno de los ejemplos (para evitar duplicación de notación).

$V.P.$ : Varianza Porcentual.

*WG 1*: Grupo de trabajo 1 (*Working Group*) del *JCGM* (*BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP* y *OIML*).

$x$ : valor de medición de magnitud de entrada en argumento de función de medición, variable independiente en ajustes lineales, identidad incógnita del analito en uno de los ejemplos.

$x_i$ : valores de medición (o valores de observación en replicados) de las magnitudes de entrada en el argumento de la función de medición.

$X_i$ : magnitudes de entrada generales en el argumento de la función de medición.

$x_j$ : valores de medición (o valores de observación en replicados) de las magnitudes de entrada en el argumento que se correlacionan con otra magnitud de entrada en ese argumento.

$X_j$ : magnitudes de entrada generales en el argumento de la función de medición, que se correlacionan con otras magnitudes de entrada en ese argumento.

*XRF*: Fluorescencia de Rayos X en uno de los ejemplos.

$x_m$ : valor promedio de mediciones repetidas, también representado con una raya sobre la  $x$ .

$y$ : valor del mensurando en general, variable dependiente en ajustes lineales.

$Y$ : magnitud de salida o mensurando en general.

$y_m$ : valor promedio del mensurando en general, también representado con una raya sobre la  $y$ .

$z$ : valor de variable normal estándar.

$Z$ : valor de informe en estudios de aptitud o estudios de colaboración conocido como  $Z$  "score", relacionado con la variable normal estándar o tipificada.

### 13 Terminología:

**Analito:** Una sustancia química definida y de estructura química conocida que puede ser un compuesto, un derivado conjugado, un metabolito o un producto de degradación.

**Calibración:** Conjunto de operaciones que permiten establecer en condiciones específicas, la relación existente entre los valores indicados (por un instrumento de medida o un sistema de

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 69 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

medida), o los valores representados por una medida materializada o un material de referencia, contra los valores correspondientes a una magnitud obtenidos mediante otra medida materializada u otro patrón de referencia, estos últimos de mayor calidad metrológica.

Corrección: valor sumado algebraicamente al resultado sin corregir de una medición, para compensar un error sistemático estimado. Si el valor de la corrección es insignificante con respecto a la incertidumbre de esa corrección, la misma se puede despreciar.

Corrección nula: término utilizado al procedimiento que implica, no realizar una corrección porque su magnitud es insignificante con respecto a su incertidumbre (ambas establecidas en el certificado) y considerar su efecto como una fuente adicional de incertidumbre de Tipo B. Aunque, en algunos casos cuando la corrección si es significativa con respecto a su incertidumbre, es una decisión del analista si aplica o no la corrección en función de la aplicación o utilidad del resultado de la medición (y en caso de no aplicarse, obligatoriamente debe considerarse en la fuente de incertidumbre), para efecto de este PON es importante señalar que de acuerdo con INTE ISO/IEC 17025: 2005 se deben aplicar todas las correcciones cuando estas son significativas (el DCF basa su sistema de gestión de calidad en la norma mencionada).

Correlación: relación entre dos o más variables aleatorias dentro de una distribución de dos o más variables aleatorias.

Covarianza: dispersión conjunta o combinada entre dos o más variables aleatorias debidas a la existencia de correlación entre las variables aleatorias.

Diagrama de Ishikawa: también denominado diagrama de "espina de pescado": diagrama de causa-efecto (Ver específicamente la Figura 1-A2, en el Anexo Número 02). En este diagrama se muestra la relación entre un atributo o característica de calidad y todos los factores que lo afectan. Este diagrama se compone: - de una columna o dorsal principal representada por una flecha, dirigida de izquierda a derecha hacia el atributo en estudio encerrado en una caja (en este caso el atributo es el mensurando y la caja es opcional), - de tantos huesos grandes representados por flechas inclinadas dirigidas hacia la columna o dorsal, desde las causas primarias (en este caso las fuentes primarias de incertidumbres combinadas, de la misma magnitud en mediciones directas o relacionadas con diferentes magnitudes en categoría para las mediciones indirectas; opcionalmente los efectos primarios pueden encerrarse en cajas), y a la vez, - de tantos huesos medianos representados por flechas horizontales, dirigidas hacia los huesos grandes, desde las causas secundarias (en este caso fuentes secundarias de incertidumbre de la misma magnitud en categoría del hueso grande). Sucesivamente, podrían existir causas terciarias (como huesos pequeños representados por flechas inclinadas o verticales, dirigidas hacia los huesos medianos desde las causas terciarias), cuaternarias, etc. Un diagrama equivalente aceptado, pero de forma diferente puede llevar a lo que se conoce como "diagrama de árbol" o "diagrama de río", los cuales no son discutidos en este PON.

Distribución de probabilidad: función que establece la probabilidad de que a una variable aleatoria se le asigne un valor dado cualquiera dentro de las posibilidades (probabilidad de ocurrencia) o pertenezca a un conjunto dado de probabilidad (probabilidad confidencial), para detalles, ver Anexo Número 03: Características de las distribuciones de probabilidad que son utilizadas comúnmente en la estimación de incertidumbres.

Error de medida: diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia o convencional.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 70 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Errores aleatorios o accidentales: son errores que el observador no puede controlar, aunque se tengan causa y efectos identificables, siendo por tanto imposible corregir de antemano sus efectos sobre los resultados. Sin embargo, es posible minimizarlos aumentando el número de réplicas o repeticiones.

Error de paralaje: error sistemático (aunque actualmente se puede considerar como un error grueso), debido a la falta de normalidad entre el eje visual del observador y el punto de lectura de la indicación de una aguja sobre una escala. En equipo volumétrico para contener y verter, también existe este error cuando hay falta de normalidad entre el eje visual del observador y el menisco del líquido sobre la escala graduada del equipo.

Errores sistemáticos: son errores de causas que pueden investigarse y una vez conocidos, su influencia puede controlarse y corregirse, de forma que pueden minimizarse e incluso eliminarse, ya sea por cálculo o por la inclusión de los pasos adecuados en el método operativo.

Escala analógica: toda escala de un instrumento que se puede leer por la indicación de una aguja sobre una escala lineal (horizontal, inclinada o vertical), circular o semi-circular, en las que hay marcas (de grosor idealmente similar a la punta de la aguja de indicación), o por la combinación de perillas ajustables con luces *LED* de indicación visual. Las marcas de la escala o la perilla, pueden estar igual o proporcionalmente distanciadas y junto a algunas de las marcas presentarse la indicación de valores numéricos y alguna unidad. En la lectura de las escalas aguja-marcas, se pueden utilizar amplificadores ópticos para incrementar la apreciación del observador, disminuyendo el factor  $A_p$  (sub-dividiendo el intervalo entre las marcas, no aplicable para las escalas perilla - *LED's*) e incluso algunas escalas pueden incorporar elementos para eliminar el error de paralaje durante la lectura.

Escala digital: toda escala de un instrumento que se puede leer por la indicación alfanumérica en un "display". La apreciación de lecturas en escalas digitales no presenta los aspectos relacionados con la apreciación del observador ni el error de paralaje.

Exactitud: es un concepto cualitativo, que implica la concordancia entre el valor obtenido en la medición materializada y el valor verdadero del mensurando. Esto requiere una combinación de alta veracidad (mínimo error sistemático o mínimo sesgo) y alta precisión (mínimo error aleatorio o máxima repetibilidad).

Factor de cobertura: factor numérico que depende de la probabilidad de cobertura y del tipo de distribución, que es usado como multiplicador de la incertidumbre combinada con el propósito de obtener una incertidumbre expandida en aplicaciones prácticas para cada área metrológica (legislación, comercio, salud, seguridad, industria e investigación).

Factor de corrección: factor numérico por el que se multiplica el resultado sin corregir de una medición para compensar un error sistemático estimado.

Fuente de incertidumbre: toda magnitud o variable, cuya indeterminación puede provocar la variación del valor del mensurando, y que se expresa por variación en la lectura, indicación o materialización de una medida con respecto al valor verdadero del mensurando.

Grados de libertad: de forma práctica, el número de observaciones menos el número de parámetros de estimación de tendencia central que fueron calculados con esas observaciones.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 71 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Estadísticamente este valor está relacionado con la característica de sesgo de los estimadores estadísticos.

**Incertidumbre combinada:** raíz cuadrada positiva de la sumatoria de todos los componentes de varianza del resultado de una medición. Esto implica que todas las componentes se han expresado como incertidumbres estándar y por lo tanto, por definición la incertidumbre combinada es una incertidumbre estándar.

**Incertidumbre de medida:** parámetro asociado con el resultado de una medición que se caracteriza con la dispersión de los valores que razonablemente puede ser atribuida al valor medio obtenido para un mensurando. Este parámetro indica un conocimiento limitado del valor verdadero de la magnitud que se mide.

**Incertidumbre estándar:** parámetro asociado con el resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores para cada distribución de probabilidad particular y está relacionado con la raíz cuadrada de la varianza de esa distribución.

**Incertidumbre expandida:** cantidad que define un intervalo alrededor del valor medio obtenido en una medición, en el que se puede esperar que se abarque una fracción o proporción grande de la distribución de valores que razonablemente pueden ser atribuidos al mesurando. Es particular para cada área metrológica (legislación, comercio, salud, seguridad, industria e investigación).

**Magnitud:** atributo o propiedad de un fenómeno, cuerpo o sustancia, de naturaleza específica, que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente mediante el valor de la magnitud, compuesta de un número (valor numérico) y una referencia (unidad). Las magnitudes pueden ser generales o particulares y en algunos casos existen magnitudes generales que son de la misma naturaleza o categoría.

**Magnitud de influencia:** en una medición directa, magnitud que no afecta la magnitud que es medida, pero que afecta la relación entre la indicación y el resultado de la medición; en medición indirecta, magnitud que no es el mensurando, pero que tiene un efecto sobre el resultado de la medición.

**Material de referencia:** Material o sustancia (gas, líquido, sólido, puro o compuesto) en la cual uno o más valores de sus propiedades son suficientemente homogéneos y están bien definidos para que se permita el utilizarlos para la calibración de un instrumento, la evaluación de un método de medición o la asignación de valores convencionales al material.

**Material de referencia certificado:** Material de referencia acompañado de un certificado, en el cual uno o más valores de sus propiedades están certificados por un procedimiento que establece su trazabilidad con una relación exacta de la unidad en la que se expresan los valores de la propiedad y para la cual cada valor certificado se acompaña de una incertidumbre expandida con la indicación de un nivel de confianza.

**Medición:** proceso que consiste en un conjunto de operaciones que tienen por finalidad obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

**Medición directa:** medición en la que todos los argumentos medidos y sus incertidumbres están en las mismas unidades que el mensurando.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 72 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Medición indirecta: medición en la que todos los argumentos medidos se transforman en la magnitud del mensurando por medio de una función de medición. Los argumentos medidos y sus incertidumbres tienen diferentes unidades que el mensurando.

Mensurando: magnitud que se desea medir.

Método de evaluación de incertidumbre Tipo A: método de evaluación de la incertidumbre que implica la valoración o el análisis estadístico de una serie de observaciones repetidas (en un mismo momento, como combinación ponderada o estimado histórico de momentos diferentes) o un conjunto de observaciones repetidas en algún diseño experimental (métodos de regresión, análisis de varianza u otros diseños experimentales).

Método de evaluación de incertidumbre Tipo B: método de evaluación de la incertidumbre que implica la valoración o el análisis por otros medios no relacionados con el análisis estadístico de series de observaciones repetidas. Su evaluación está basada en juicios y criterios científicos a partir de la mejor información posible. Esta información puede incluir: datos de mediciones anteriores, experiencia en el comportamiento del instrumento, especificaciones del fabricante, certificados de calibración, incertidumbre de los datos de referencia tomados de manuales, el propio diseño del procedimiento de medición, entre otros.

Método de medida: conjunto o sucesión lógica de operaciones, descritas de forma genérica, utilizadas en la ejecución de las mediciones.

Método de referencia: Método investigado a fondo, que describe con claridad las condiciones y los procedimientos necesarios para medir los valores de una o más propiedades y que ha demostrado tener una exactitud apropiadas para el uso que pretende hacerse del mismo.

Patrón: Medida materializada, instrumento de medida, material de referencia o sistema de medida destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad, uno o varios valores de una magnitud para que sirvan de referencia.

Precisión: El grado de concordancia entre los resultados, obtenidos al aplicar el procedimiento experimental en repetidas veces, bajo las condiciones establecidas sobre la misma muestra homogénea. Depende sólo de la distribución de errores aleatorios y no tiene ninguna relación con el valor verdadero o el valor especificado. Se expresa en términos de imprecisión y se calcula como la desviación estándar de los resultados de las mediciones. Una menor precisión se refleja por una mayor desviación estándar. Es un indicador de la dispersión entre los datos y se relaciona con los errores aleatorios, también se denomina fidelidad.

Precisión intermedia: se refiere a las variaciones en un mismo laboratorio pero en diferentes días y diferentes analistas.

Presupuesto de incertidumbres: cuadro de datos y resultados de todas las componentes que se consideran en una estimación de incertidumbres para un mensurando definido (ver las columnas y filas de esta tabulación en el Cuadro I-A4 y un ejemplo de su aplicación en el Anexo Número 04).

Principio de medida: base o fundamento científico de una medición.



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 73 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Probabilidad: número real, entre 0 y 1, asociado a un suceso aleatorio o para la obtención de una observación de una variable aleatoria.

Procedimiento de medida: conjunto o sucesión lógica de operaciones, descritas de forma específica, utilizadas en la ejecución de mediciones particulares.

Re-calibración continua: todo patrón dentro de una cadena de trazabilidad, necesita ser recalibrado cada cierto tiempo, aún los patrones del SI deben ser evaluados y verificados cada cierto tiempo con el avance tecnológico. Esto significa de si no se realiza la calibración (o evaluación o verificación de la definición o patrón SI), se puede perder la trazabilidad.

Regla de decisión: Regla que describe cómo se toma en cuenta la incertidumbre de medición cuando se declara la conformidad con un requisito especificado.

Repetibilidad: Precisión de los resultados de una medición obtenidos con el mismo método, con el mismo operador, utilizando el mismo instrumento de medida y durante un intervalo de tiempo corto (menor a una semana).

Repeticiones: Varias lecturas instrumentales para una sola preparación.

Réplicas: Varias lecturas instrumentales para preparaciones independientes.

Reproducibilidad: Precisión bajo condiciones en las que los resultados de una medición se obtienen con el mismo método, sobre el mismo mensurando, con diferentes operadores, diferentes equipos de medida, en diferentes laboratorios, etc.

Resultado de una medición: valor atribuido a un mensurando, que es obtenido por medición.

Resultado corregido: resultado de una medición, después de la corrección de errores sistemáticos.

Resultado sin corregir: resultado de una medición, antes de la corrección de errores sistemáticos.

Sesgo: diferencia entre el promedio de indicaciones repetidas y el valor aceptado como verdadero,

Trazabilidad: Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencias determinadas generalmente a patrones nacionales o internacionales por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones, las cuales tienen todas sus incertidumbres determinadas. Deben existir seis características en esta propiedad: I) cadena ininterrumpida de comparaciones, II) incertidumbre de medida conocida, III) documentación identificada y ubicada, IV) competencia demostrada, V) referencia a unidades del Sistema Internacional y VI) re-calibraciones continuas de los patrones.

Validación: Es la confirmación, mediante examen y la aportación de evidencias objetivas que demuestren el cumplimiento de ciertos requisitos para el uso específico previsto de la metodología. Esto implica generar una base documental directa que, para efectos de este PON corresponde a los registros indicados en el "Procedimiento de Operación Normado para la validación de métodos de análisis forenses".

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 74 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Valor de una magnitud: expresión cuantitativa de una magnitud particular, generalmente en forma de un número (denominado valor numérico) multiplicado por una unidad de medida.

Valor convencional de una magnitud: valor que se asigna a una magnitud, mediante un acuerdo para determinados propósitos.

Valor verdadero de una magnitud: valor que es consistente con la definición de una magnitud, que se obtendría mediante una medición perfecta. Es indeterminado o desconocido por naturaleza.

Variable aleatoria: variable que puede tomar cualquiera de los valores de un conjunto determinado de valores, y a la que se asocia una distribución de probabilidad.

Varianza: media de las desviaciones cuadráticas de una variable aleatoria, referidas al valor medio de esta. Para una variable aleatoria centrada (con promedio esperado igual a cero) es la media de las desviaciones cuadráticas referidas a cero.

Veracidad: es el grado de concordancia entre el resultado de la medición y el valor de referencia aceptado como verdadero para un estándar internacional, nacional, institucional o del propio laboratorio. La veracidad está relacionada inversamente con el error sistemático (sea ambiental, instrumental, metodológico o del analista).

Unidad: magnitud escalar real, definida y adoptada por convenio, con la que se puede comparar cualquier otra magnitud de la misma naturaleza, para expresar la relación entre ambas mediante un número (valor numérico). La unidad de las magnitudes que no tienen dimensiones es el uno (el número uno).

## 14 Anexos

No. de Anexo	Nombre del Anexo
<b>01</b>	Teoría y prácticas recomendadas sobre la estimación de incertidumbres de las mediciones.
<b>02</b>	Estimación de incertidumbre en ensayos microbiológicos y biológicos, ensayos cualitativos y ADN.
<b>03</b>	Características de las distribuciones de probabilidad comunes que son utilizadas en la estimación de incertidumbres.
<b>04</b>	Herramientas estadísticas útiles para la estimación de incertidumbres de "arriba hacia abajo".
<b>05</b>	Formulario de Presupuesto de incertidumbres, Ejemplo correspondiente de Registros.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 75 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

## **Anexo Número 01**

### **Teoría y prácticas recomendadas sobre la estimación de incertidumbre de las mediciones**

#### **A1.1) Fundamento Teórico:**

Cuando se informa el resultado de toda medición de cualquier magnitud (ya sea física, química, físico-química e incluso biológica o microbiológica), es necesario proporcionar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de manera tal que los usuarios puedan apreciar su confiabilidad y por lo tanto su calidad.

Con relación a la estimación de incertidumbres, la norma INTE ISO/IEC 17025: 2005 indica de forma general algunos en diferentes apartados. En ellos por ejemplo, en el punto 5.1.2 (p. 17), se establece:

*"El grado con el que los factores contribuyen a la incertidumbre total de la medición difiere considerablemente según los ensayos (y tipos de ensayos) y calibraciones (y tipos de calibraciones). El laboratorio debe tener en cuenta estos factores al desarrollar los métodos y procedimientos de ensayo y de calibración, en la formación y la calificación del personal, así como en la selección y la calibración de los equipos utilizados."*

También por ejemplo, la norma en el punto 5.4.1 (p. 17), establece:

*"El laboratorio debe aplicar métodos y procedimientos apropiados para todos los ensayos o las calibraciones dentro de su alcance. Estos incluyen el muestreo, la manipulación, el transporte, el almacenamiento y la preparación de los ítems a ensayar o a calibrar y, cuando corresponda, la estimación de la incertidumbre de la medición así como técnicas estadísticas para el análisis de los datos de los ensayos o de las calibraciones."*

#### **A1.2) Métodos de "abajo hacia arriba" ("bottom-up")**

De acuerdo con el documento JCGM 100-2008, Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of Uncertainty in Measurement, versión 2008, el cual en algunas partes de este procedimiento se denomina simplemente sólo como GUM-2008, una forma de registrar la calidad de un resultado de medición, es a través de la expresión de su incertidumbre, mediante algún proceso claramente definido.

La incertidumbre en los resultados de medición surge por la imperfección natural de los procesos de medición, la cual hace imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de una magnitud. Es por esto que toda medición lleva implícita una incertidumbre y por lo tanto, todo resultado de medición debe ir acompañado de su incertidumbre, porque un resultado de una medición solo está completo cuando contiene tanto el valor atribuido al mensurando como la incertidumbre de medida asociada a dicho valor. Para conocer esa incertidumbre es necesario definir algún proceso o procedimiento.

El proceso de análisis de las fuentes de incertidumbre, su mejor estimación y su valoración crítica, en conjunto permiten garantizar la consistencia y confiabilidad de los resultados obtenidos (tanto cuantitativos como cualitativos). Esta garantía se fundamenta, porque una adecuada estimación de la incertidumbre, permite reconocer que para todo resultado de medición no hay un solo valor posible, sino un número infinito de valores dispersos alrededor

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 76 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

del *resultado medio* obtenido. La estimación de un intervalo realista sobre el resultado, le da mayor calidad al propio resultado, lo cual es esencial para los resultados de pericias o peritajes que se incorporan como *elementos de prueba material* en las causas judiciales. Adicionalmente, al expresar la incertidumbre se cumple con los estándares internacionales de admisibilidad en corte porque se demuestra la capacidad para realizar análisis de significancia legal o reglamentaria.

En la práctica, entre las fuentes de incertidumbre, no necesariamente independientes entre sí (ver detalles en la versión digital de la *GUM-2008*, referencia 7.10, en [www.bipm.org](http://www.bipm.org)), se pueden citar de forma muy general:

- definición incompleta del mensurando.
- realización imperfecta de la definición del mensurando.
- muestras no representativas de un mensurando.
- conocimiento inadecuado de los efectos de las condiciones ambientales o medición imperfecta de las condiciones ambientales.
- errores en la lectura de los instrumentos analógicos por parte del analista.
- resolución o umbral de discriminación finitos en los instrumentos.
- inexactitud en los valores de los patrones de medición o los materiales de referencia.
- inexactitud de las constantes y otros parámetros, considerados como parte de la función o modelo de medición y en el algoritmo de cálculo o de tratamiento de datos.
- aproximaciones o suposiciones incorporadas en el método de medición y en el procedimiento de medida.
- variaciones en las observaciones repetidas bajo condiciones aparentemente idénticas (falta de repetibilidad).

De acuerdo con la *GUM*, la incertidumbre debe ser obtenida por un método o proceso que sea *universal* (aplicable a todo tipo de medición y a todo tipo de datos), *consistente internamente* (obtenerse directamente a partir de los componentes que contribuyen, independientemente de la forma en que se agrupen o descompongan, ya sea en componentes o subcomponentes), así como *transferible* (que se pueda utilizar directamente el resultado de una incertidumbre obtenida para un resultado, como componente de incertidumbre sobre otra medición en la que intervenga la primera). Con todas las características anteriores, cumple la estimación de la *incertidumbre combinada*.

Como además, dependiendo de las aplicaciones industriales o comerciales, del área de la salud y de la seguridad; en algunas ocasiones es necesario proporcionar un intervalo en torno al resultado de medición (en el que es factible esperar la mayor parte de los valores de la distribución que puede ser razonablemente atribuida a la magnitud en medición), se hace necesario considerar adicionalmente un método para expresar la incertidumbre de medida como un intervalo, en el cual se conozca la probabilidad o nivel de cobertura que corresponde de forma realista con lo requerido. La *incertidumbre expandida* cumple con todo lo anterior.

De forma general, el proceso de estimación de la incertidumbre implica los siguientes pasos:

- una correcta definición del mensurando,
- una expresión explícita de la función de medición,
- una valoración e identificación de todas las fuentes de incertidumbre,
- la cuantificación de todas las fuentes de incertidumbre, así como la asignación de una distribución de probabilidad para cada fuente,
- una reducción o estandarización de todas las componentes,

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 77 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

- una evaluación de la posible correlación entre las variables de influencia,
- la combinación de todas las fuentes en una incertidumbre combinada (estándar por definición),
- una valoración cuantitativa o cualitativa de la importancia de las fuentes
- la elección del nivel de probabilidad de cobertura deseado
- una valoración del cumplimiento del Teorema del Límite Central (normalidad)
- la estimación del factor de cobertura correspondiente,
- la expansión de la incertidumbre combinada, para obtener la expandida,
- el informe del resultado, y finalmente,
- la elaboración del "presupuesto" de incertidumbres.

En la aplicación del proceso anterior, solamente es necesario tener dos cuidados importantes que se consideran faltas en una auditoría de la estimación de la incertidumbre. La primera falta, es no incluir o dejar de considerar fuentes de incertidumbre importantes, mientras que la segunda falta, es duplicar o considerar más de una vez en la estimación a algunas de las fuentes de incertidumbre.

En este punto, es importante mencionar la siguiente cita, que es aplicable en todos sus extremos a la parte del procedimiento que se refiere a los métodos de "abajo hacia arriba" de este Procedimiento de Operación Normado, el cual:

... "provee una estructura para estimar la incertidumbre, la misma no puede sustituir el pensamiento crítico, la honestidad intelectual ni las destrezas profesionales. La evaluación de la incertidumbre no es ni una tarea rutinaria, ni una tarea puramente matemática; y depende del conocimiento detallado de la naturaleza del mensurando y del proceso o sistema de medición. La calidad y utilidad de la incertidumbre obtenida para el resultado de una medición, por consiguiente, depende de la comprensión, el análisis crítico y la integridad de quienes contribuyen a la asignación de ese valor de incertidumbre" (Adams, 2002).

Sin embargo, la misma *GUM*. 2008, en su punto 3.4.1, indica:

"Si se hacen varias todas las magnitudes de las que depende el resultado de una medición, su incertidumbre puede evaluarse por métodos estadísticos. En la práctica, sin embargo, esto no es posible, por limitaciones de tiempo y de recursos; por ello, la incertidumbre de un resultado de medida habitualmente se evalúa acudiendo a un modelo matemático de medición, y la ley de propagación de incertidumbre. En la presente Guía está implícita la hipótesis de que a toda medición puede hacersele corresponder un modelo matemático, hasta el grado impuesto por la exactitud requerida en la medición".

Conociendo la limitación a la que se refiere la cita anterior, y utilizando alternativas para el "modelo matemático" y usando la ley de propagación de incertidumbre, es que por lo tanto, algunos organismos y autores han desarrollado otros métodos, como los que se describen en el siguiente apartado.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 78 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

### **A1.3) Métodos de “arriba hacia abajo” (“top-down”)**

Generalmente, se pueden aplicar métodos de estimación por medio de evaluaciones estadísticas de datos, en forma similar a los métodos de medición directa, que para la *GUM* se denominan como métodos de evaluación tipo A, pero sin descomponer todas las fuentes o componentes de variación. Si se utilizan diseños experimentales apropiados, de forma que se puede realizar un cálculo directo de la dispersión de medida, en un ámbito de experimentos que cubran todos los factores que probablemente contribuyen a la incertidumbre, como lo son el operador, el aparato y el medio ambiente (por citar algunos), también se cumple con el requisito para el manejo global de todos los factores contribuyentes a la incertidumbre global de medida.

La aceptación de los siguientes métodos se debe principalmente a dos aspectos, en primer lugar al menor esfuerzo, por la menor complicación y su mayor simplicidad (sin necesidad de comprender todos los recursos formalmente matemáticos que actualmente contempla la *GUM-2008*) y en segundo lugar, al argumento de que los valores obtenidos son más realistas porque se obtienen en condiciones de análisis normales, aunque en su fondo, esto puede significar que son más pesimistas, porque se obtiene valores de estimación siempre mayores a las estimaciones con base en la *GUM 2008* (se menciona que esa guía, indica explícitamente no estar de acuerdo en estimaciones pesimistas con el fin de ampliar los intervalos de estimación “seguros” de una incertidumbre) y adicionalmente tiene el mérito sobre el procedimiento *GUM 2008*, que este último, en algunas ocasiones no se considera el muestreo o la homogenización de la muestra como parte del proceso.

Estos algunos de los métodos de este enfoque, se asume que todas las fuentes de errores por efectos sistemáticos significativos han sido identificadas, y que a la vez se han eliminado sus efectos, o al menos se han compensado (por la aplicación, ya sea de las correcciones o de los factores de corrección, adecuados). Por otro lado, en otros la corrección por medio de un factor de corrección se realiza directamente en los cálculos finales del mensurando (aplicando las correcciones o los factores de corrección correspondientes y considerándolos como fuentes de incertidumbre). De acuerdo con las fuentes consultadas, estos procedimientos se basan en conceptos de la familia de normas *ISO 5725*, en la norma *ISO 8258* y el enfoque alternativo mencionado en la Nota N.º 75, se basa en la guía técnica *ISO/TS 21748: 2004*.

La única desventaja que tienen los enfoques de este apartado, es que se debe tener toda la cristalería volumétrica, el instrumental de pesaje analítico (balanzas) y los equipos accesorios, bajo un estricto control metrológico (pues de otra forma no se podrían aplicar las correcciones correspondientes para compensar los errores sistemáticos). Adicionalmente en algunos casos además es necesario llevar el control del instrumental por medio de la comparación de los resultados obtenidos en los análisis o determinaciones con muestras de control, certificadas o por lo menos reconocidas, las cuales además obligatoriamente deben poseer aproximadamente la misma concentración del analito, analizarse de la misma forma o aplicándoles el mismo procedimiento o tratamiento que las muestras reales. Aunque dependiendo de la metodología, se pueden llevar controles para diferentes niveles de concentración al que se presenta en las muestras reales. En un nivel superior, se puede necesitar de la participación en Ensayos de Suficiencia (ES) o en Ensayos de Colaboración (EC), los cuales no siempre están disponibles en todas las áreas, o representan un costo elevado.

Como se puede apreciar, la ganancia en cuanto al tratamiento menos matemático de estos enfoques, se ve posiblemente compensada con los requisitos necesarios adicionales e indispensables para la mayoría de las estimaciones. Esto requisitos representan un alto costo

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 79 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

en la correcta calibración y la participación en ensayos inter-laboratorio (sean solamente Ensayos de Suficiencia o tan complejos como los Ensayos de Colaboración). Solamente se menciona el tratamiento "matemático" y no el tratamiento estadístico, porque desde el punto de vista estadístico, el análisis de los métodos de estos enfoques es similar o más complejo y profundo que el requerido por el método de la *GUM* 2008.

Para obtener los resultados de este método alternativo directo, se utilizan medidas repetidas de las diferentes partes de todo el proceso. La Guía *EURACHEM/CITAC* "Incertidumbre de medida que surge del muestreo: guía de métodos y enfoques", afirma que los métodos preferidos para medir la incertidumbre de medida en ensayos cualitativos, es la aplicación de estos métodos de medición directa global, junto con el criterio profesional, sin ahondar en el establecimiento de los presupuestos detallados de componentes o fuentes de incertidumbre. Aún en el caso de que no sea posible utilizar diseños experimentales que permitan utilizar el método directo para determinar la incertidumbre global de una medición, ésta se puede calcular sobre la base del criterio profesional y las experiencias previas, claro que en este caso, el método de evaluación de la incertidumbre ya es de tipo B.

Además en algunas aplicaciones, puede ser importante solamente conocer la variación general de una metodología de medición, de forma gruesa o a "grosso modo". Por ejemplo, algunas organizaciones como ANAB, establecen:

"En ningún proceso de medida existe una IM (Incertidumbre de Medida) de medida fija aceptable, puesto que ésta se determina según el concepto de si se ajusta al fin. Si el valor de la IM cumple con las necesidades del cliente y es aceptable para la unidad forense, entonces la IM es la indicada y el proceso se adapta al fin. Todas las instituciones forenses que utilizan dispositivos de medición deben saber si estos dispositivos satisfacen las necesidades de la institución. Si no calcula la incertidumbre, la entidad forense no puede saber si los instrumentos de medición ofrecen la suficiente información y si ésta es la indicada." (ANAB, 2015)

Este enfoque, obedece a la sugerencia de otras instituciones y autores, especialmente para mediciones en el campo de la química, la microbiología y la farmacia, en cuyos métodos se tiene la influencia de una gran variedad de condiciones durante los diversos pasos de muestreo, tratamiento (homogenización, extracción, derivatización, etc.), que en conjunto con la medición instrumental (en la mayoría de las veces de forma indirecta con equipos más complejos que los instrumentos de medición directa) implican una gran cantidad de factores como para determinar el efecto e influencia de todas las fuentes o componentes de la incertidumbre.

Se debe mencionar, que el enfoque anterior, también cumple con lo establecido en la Norma INTE *ISO/IEC* 17025: 2005, que en su apartado 5.4.6 Estimación de la incertidumbre de medición, establece la necesidad de un procedimiento para la estimación de incertidumbre, con al menos la necesidad de identificar todos los componentes y hacer una estimación razonable, que no dé una impresión equivocada. Indica, además que la estimación se puede basar en la experiencia adquirida y en datos de validaciones anteriores. Con respecto al rigor de la estimación, señala que se establecen tres elementos a considerar; que a saber son:

- los requisitos del método,
- los requisitos del cliente, y
- la necesidad de cumplir límites reglamentarios o de especificación.

Por otra parte, ese enfoque, también cumple con los requerimientos de entes acreditadores reconocidos como el Ente Costarricense de Acreditación (ECA) y ANAB. Por ejemplo, la política P-DCFGCG-JEF-001-R2, Versión 01  
Emitido y Aprobado por Unidad de Gestión de Calidad

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 80 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

del ECA, indica que se "*deben mantener evidencia documentada que soporte sus declaraciones de incertidumbre*" (ECA-MC-PO02, 2014, p. 9). Para esto último, según el punto 7.7 de esa Política del ECA, se debe incluir (2014, p. 9):

"(...)

a. *Memoria de cálculo.*

b. *Datos*

c. *Procedimiento de estimación de la incertidumbre.*

d. *Demostración de la validez de los resultados de estimación de la incertidumbre."*

Aunque para ese último inciso "d" no se indican aspectos particulares, nuevamente se interpreta de acuerdo con la normativa, que la "*demostración de validez de los resultados*" implica el aporte de evidencia objetiva y por lo tanto documental, específicamente con relación a que se haya verificado la naturaleza real de la estimación de incertidumbre realizada.

#### **A1.4) Consideraciones adicionales sobre la elaboración de este PON:**

El presente procedimiento de operación normado fue revisado por una Comisión, conformada por funcionarios de este Departamento, pertenecientes a las diversas secciones, convocada para estos efectos por la Jefatura Departamental (M.B.A. Mauricio Chacón Hernández). Dicha Comisión estuvo integrada por: Licda. Gina Bagnarello Madrigal (coordinadora), Lic. Francisco Calvo González, Lic. Ronald Alberto Castro Esquivel, Máster Harley Chacón Núñez, Dr. Alejandro Hernández Bolaños, Máster Daniel Gómez Murillo, Dr. Marco Martínez Esquivel, Lic. César Pérez Alfaro y MSc. Steven Vargas Ramírez. Esta versión 02 se encuentra basada completamente en la versión 01, la cual fue revisada y corregida integralmente por el Lic. Ronald Alberto Castro Esquivel (Técnico en Metrología), como parte del trabajo final de aplicación para alcanzar el título de Técnico Superior en Gestor de Calidad.

Para la elaboración de este anexo se utilizaron también prácticamente todas las referencias bibliográficas indicadas en el apartado 3. Referencias de este Procedimiento de Operación Normado.



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 81 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

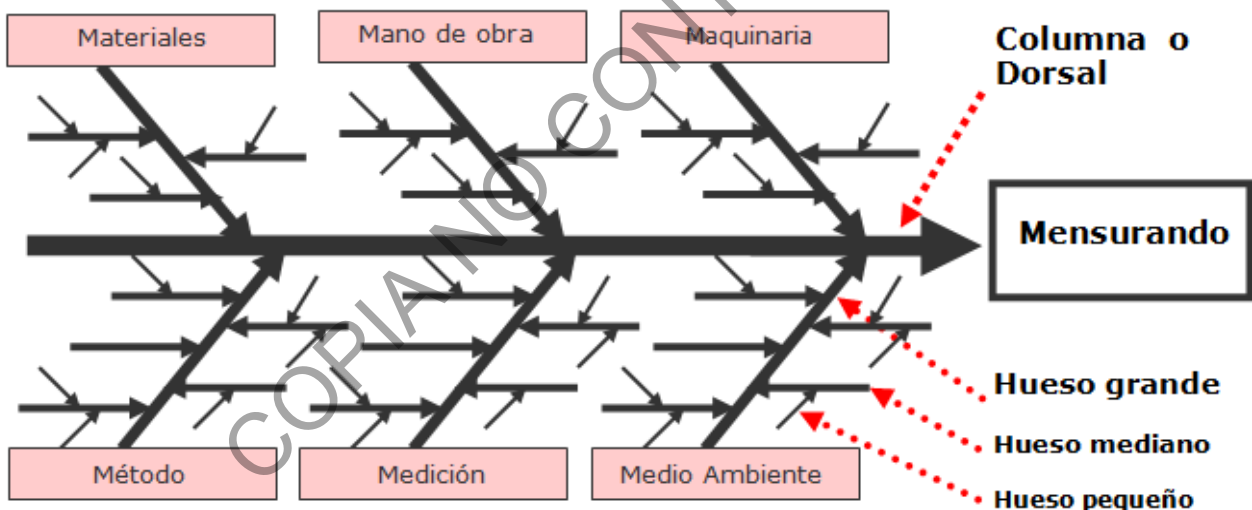
## Anexo Número 02

### Estimación de incertidumbre en ensayos microbiológicos y biológicos, ensayos cualitativos y ensayos de ADN

En aquellos casos de metodologías dentro del alcance de este PON, en los que no se pueda realizar una estimación por alguno de los métodos del apartado de procedimiento, se realizará un análisis cualitativo, que permita determinar las fuentes de incertidumbre, por medio de un diagrama de Ishikawa, tal y como se detalla en este anexo.

#### A2.1) Análisis de incertidumbres para análisis cualitativos de diagnóstico clínico: restringido a aquellos análisis que tienen solo dos posibles resultados (ejemplo: positivo/negativo, presencia/ausencia, reactivo/no reactivo, coincide/no coincide):

La incertidumbre del mesurando no será calculada, se buscará controlar las fuentes de incertidumbre de dicho mesurando, para esto determine todas las fuentes de incertidumbres del mesurando, para lo cual aplique el diagrama causa-efecto, "espina de pescado" o Ishikawa (ver Figura 1-A2).



**Figura 1-A2.** Diagrama de Ishikawa o Diagrama de causa - efecto

**A2.1.1** Diagrama de causa-efecto ("espina de pescado" o diagrama de Ishikawa): Seleccione o defina el mesurando a analizar.

**A2.1.2** Coloque dicho mesurando dentro de un rectángulo al lado derecho de una hoja de papel y dibuje de izquierda a derecha la línea de la "columna o dorsal", hasta pegar con el rectángulo del punto anterior.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 82 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**A2.1.3** Determine causas probables de incertidumbre del mesurando, agrúpelas en seis niveles básicos o causas primarias (6 M's), a saber:

- Materiales (Factores de los insumos),
- Mano de obra (Factores humanos),
- Maquinaria (Factores instrumentales),
- Método (Factores metodológicos),
- Medición (Factores de principios, fundamentos y tecnológicos), y
- Medio ambiente (Factores ambientales).

**A2.1.4** Dibuje líneas inclinadas (huesos grandes) que apunten hacia la "columna vertebral" y describa dentro de rectángulos los factores, niveles básicos o causas primarias (indicadas anteriormente), que afectan al mesurando definido.

**A2.1.5** Proceder para cada uno de estos niveles a hacer la pregunta: ¿Por qué sucede?

**A2.1.6** Dibuje líneas inclinadas (huesos medianos), que apunten hacia las líneas inclinadas de las causas primarias (huesos grandes), dichas líneas representan las causas secundarias que afectan a las causas primarias (estas son las respuestas a la pregunta anterior de ¿por qué sucede?). Proceder para cada una de las causas secundarias, a realizar la pregunta: ¿Por qué sucede?

**A2.1.7** Dibujar líneas inclinadas (huesos pequeños), que apunten hacia las líneas inclinadas de las causas secundarias (huesos medianos), dichas líneas representan las causas terciarias que afectan a las causas secundarias. Proceder para cada una de las causas terciarias a realizar la pregunta: ¿Por qué sucede?

**A2.1.8** Siga determinando causas hasta que pueda asignar importancia a cada factor (nivel básico o causas primarias) y marque los que son particularmente importantes (tienen un efecto significativo sobre la incertidumbre del mesurando), estas serán las fuentes de incertidumbre principales del mensurando.

**A2.1.9** Una vez identificadas las fuentes de incertidumbre principales del mensurando, asegúrese de controlar las mismas, por ejemplo si es importante la Temperatura: mantenga un sistema de registro de temperaturas de manera que le permita detectar y corregir efectos de las variaciones.

**A2.2) Cálculo de incertidumbres para análisis clínicos semi-cuantitativos cuyo resultado es producto de la observación directa del espécimen (ejemplo: análisis microscópico del sedimento urinario, recuentos de leucositos):**

Se calcula la desviación estándar de las diferencias (se utiliza como ejemplo un recuento leucocitario realizado en una cámara de Neubauer).

**A2.2.1** Realice al menos 40 recuentos de una misma muestra.

**A2.2.3** Analice los recuentos por duplicado en días diferentes, idealmente por tres analistas diferentes, los cuales se distribuirán la carga de trabajo (recuentos) equitativamente (para 40 recuentos, analice 2 recuentos cada día para un total de 20 días). El análisis implicará la dilución y montaje de la cámara de Neubauer para su observación al microscopio.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 83 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**A2.2.4** Complete el cuadro de la página siguiente y determine la diferencia de cada medición, posteriormente determine la desviación estándar de las diferencias.

Cuadro I-A2. Determinación de desviación estándar de diferencias

No. de determinación	1er observación	2da observación	Magnitud de la diferencia entre las observaciones
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
<b>Desviación estándar de las diferencias:</b>			

**A2.2.5** La incertidumbre de la medición, será el promedio de las diferencias (el promedio y la dispersión con numéricamente iguales).

### **A2.3) Cálculo de incertidumbre para análisis cualitativos**

Para los análisis cualitativos de cualquier tipo, en los que los resultados solamente se pueden clasificar como positivo o negativo, lo cual implica un umbral en la determinación, por lo que lo correcto es formalmente detectado y no detectado. Una incertidumbre se puede estimar como la probabilidad de error obtenida como el complemento de la razón de eficiencia, evaluada bajo condiciones de repetibilidad o reproducibilidad establecidas normalmente cerca del umbral de decisión. Para la valoración de la razón de eficiencia se puede consultar el PON de validación.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 84 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

### Anexo Número 03

## Características de las distribuciones de probabilidad comunes que son utilizadas en la estimación de incertidumbres

### A3.1) Características de las distribuciones:

Para las distribuciones que aplique, el término "a", representa el semi-intervalo o parámetro de media escala definido por el intervalo de aplicación de la distribución de probabilidad. Los demás términos se definen en el apartado de **12 Simbología**. En este anexo, siempre que se mencione una distribución, se hace referencia a la función de densidad de probabilidad (es decir a la función diferencial de probabilidad y no a la función integral de probabilidad).

#### I) Distribución normal:

**I.1)** La frecuencia máxima para las distribuciones específicas (cuando no están tipificadas o centradas, expresadas por la variable aleatoria general  $x$ ), está dada por:

$$f(x = x_m) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}}$$

Por otro lado, la frecuencia máxima en la curva normal para variable tipificada (denominada como variable  $z$ ), la cual está centrada en cero y se extiende desde  $-\infty$  hasta  $+\infty$ , está dada por:

$$f(z = 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$$

**I.2)** El área normalizada, se obtiene por integración numérica de la función suave y continúa, en el intervalo de variación de  $z$  desde  $-\infty$  hasta  $+\infty$ . La variable  $z$  es la que se obtiene luego de normalizar o tipificar (centrar) la variable aleatoria  $x$ , expresándola como la variable estándar  $z$ :

$$z = \frac{(x - x_m)}{s} = \frac{(x - \mu)}{\sigma}$$

$$\text{área normalizada} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(z) dz = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 1$$

**I.3)** En esta distribución entre  $\pm 1$  una desviación estándar de la población tipificada, se encuentran el 68,27 % de los datos ( $p = 0,6827$ ). Este intervalo se puede calcular como:

$$u(NORMAL) = \pm 1 \cdot \sigma$$

Esta es una *incertidumbre estándar* para esta distribución.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 85 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

## II) Distribución rectangular:

**II.1)** La frecuencia máxima, la cual es uniforme en todo el intervalo de la distribución, está dada por:

$$f(-a \leq z \leq +a) = \frac{1}{2 \cdot a}$$

**II.2)** El área normalizada se puede obtener con la fórmula del área de un rectángulo, es decir el producto de la base (amplitud,  $2 \cdot a$ ) por la altura (frecuencia máxima y uniforme,  $1 / (2 \cdot a)$ ):

$$\text{área normalizada} = \int_{-a}^{+a} f(z) dz = (2 \cdot a) \left( \frac{1}{2 \cdot a} \right) = 1$$

**II.3)** En esta distribución entre  $\pm 1$  una desviación estándar se encuentran el 57,74 % de los datos ( $p = 0,5774$ ). Este intervalo se puede calcular por el "segmento acotado":

$$u(\text{RECTANGULAR SIMETRICA}) = \pm \frac{a}{\sqrt{3}} \approx \pm 0,5774 \cdot a$$

Esta es una *incertidumbre estándar* para esta distribución. Cuando la distribución rectangular es asimétrica, se debe utilizar como estimador de la incertidumbre estándar el "segmento acotado" determinado por la expresión siguiente:

$$u(\text{RECTANGULAR ASIMETRICA}) = \pm \frac{(a_+ + a_-)}{\sqrt{12}} \approx \pm 0,2887 \cdot (a_+ + a_-)$$

## III) Distribución triangular:

**III.1)** La frecuencia máxima, en el centro para la distribución simétrica, está dada por:

$$f(z = 0) = \frac{1}{a}$$

**III.2)** El área normalizada se puede obtener con la fórmula del área de un triángulo, es decir el producto de la base (amplitud,  $2 \cdot a$ ) por la altura (frecuencia máxima en el centro,  $1 / a$ ), dividida entre 2, es decir se encuentra determinada por:

$$\text{área normalizada} = \int_{-a}^{+a} f(z) dz = \frac{(2 \cdot a) \cdot \left( \frac{1}{a} \right)}{2} = 1$$

**III.3)** En esta distribución entre  $\pm 1$  una desviación estándar se encuentran el 64,98 % de los datos ( $p = 0,6498$ ). Este intervalo se puede calcular por el "segmento acotado":

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 86 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

$$u(\text{TRIANGULAR SIMETRICA}) = \pm \frac{a}{\sqrt{6}} \approx \pm 0,4082 \cdot a$$

Esta es una *incertidumbre estándar* para esta distribución. Cuando la distribución triangular es asimétrica, se debe utilizar como estimador de la incertidumbre estándar el "segmento acotado" determinado por la expresión siguiente:

$$u(\text{TRIANGULAR ASIMETRICA}) = \pm \frac{(a_+ + a_-)}{\sqrt{24}} \approx \pm 0,2041 \cdot (a_+ + a_-)$$

#### IV) Distribución trapezoidal:

**IV.1)** La frecuencia máxima, uniforme dentro de la región central definida por la "base" menor representada por  $A$ , y definiendo a  $B$  como la base mayor (base real) o amplitud de la distribución ( $B = 2 \cdot a$ ), está dada por:

$$f\left(\frac{(A-B)}{2} \leq z \leq \frac{(B-A)}{2}\right) = \frac{2}{(B+A)}$$

**IV.2)** El área normalizada se puede obtener con la fórmula del área de un trapecio, es decir como el producto de la suma de la "base" menor y la base mayor (o sea:  $A + B$ ) por la altura (frecuencia máxima uniforme parcialmente,  $2 / (B + A)$ ), dividida entre 2, por lo que está determinada por:

$$\text{área normalizada} = \int_{-a}^{+a} f(z) dz = \frac{(B+A) \cdot \left[ \frac{2}{(B+A)} \right]}{2} = 1$$

**IV.3)** En este caso, si se define el parámetro  $\beta = A / B$ , la desviación estándar puede calcularse por el "segmento acotado":

$$u(\text{TRAPEZOIDAL SIMETRICA}) = \pm a \cdot \sqrt{\frac{(1+\beta^2)}{6}} \approx \pm 0,4082 \cdot a \cdot \sqrt{(1+\beta^2)}$$

Esta es una *incertidumbre estándar* para esta distribución.

Obsérvese, que para una distribución rectangular  $A = B$  y por lo tanto el parámetro  $\beta = B / B = 1$ , mientras que para una distribución triangular  $A = 0$  y por lo tanto el parámetro  $\beta = 0 / B = 0$ .

El valor del parámetro  $\beta$  puede encontrarse entre 0 (para una triangular) y 1 (para una rectangular), por lo que en una desviación estándar se puede encontrar desde un 64,98 % de los datos (para la triangular), hasta un 57,73 % de los datos (para la rectangular).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 87 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Por ejemplo, una trapezoidal en la que  $A = B / 2$ , implica un parámetro  $\beta = 1 / 2$  y el "segmento acotado" es en este caso particular:

$$u(\text{Trap Sim}, \beta = 1/2) = \pm a \cdot \sqrt{\frac{[1+(1/2)^2]}{6}} = \pm a \cdot \sqrt{\frac{(1+1/4)}{6}} = \pm a \cdot \sqrt{\frac{(4/4+1/4)}{6}}$$

$$= \pm a \cdot \sqrt{\frac{(5/4)}{6}} = \pm a \cdot \sqrt{\frac{5}{24}} = \pm \frac{a}{\sqrt{24}} = \pm \frac{a}{\sqrt{4,8}} \approx \pm 0,4564 \cdot a$$

En ese segmento equivalente a una desviación estándar se encuentran el 60,86 % de los datos ( $p = 0,6086$ ).

Para una distribución trapezoidal asimétrica, la *incertidumbre estándar* se puede aproximar con el "segmento acotado" dado por la fórmula general siguiente:

$$u(\text{TRAPEZOIDAL ASIMETRICA}) = \pm(a_+ + a_-) \cdot \sqrt{\frac{(1+\beta^2)}{24}} \approx \pm 0,2041 \cdot (a_+ + a_-) \cdot \sqrt{(1+\beta^2)}$$

## V) Distribución en forma de "U"

**V.1)** La frecuencia máxima está indefinida en los extremos, pero la frecuencia mínima está en el centro de amplitud dada por:

$$f(x=0) = \frac{1}{\pi \cdot a}$$

**V.2)** El área normalizada, se obtiene por integración numérica de la función suave y continua, en el intervalo desde  $-a$  hasta  $+a$ , está dada por:

$$\text{área normalizada} = \int_{-a}^{+a} f(x) dx = \int_{-a}^{+a} \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{(a^2 - x^2)}} dx = 1$$

**V.3)** En esta distribución entre  $\pm 1$  una desviación estándar se encuentran el 50,00 % de los datos ( $p = 0,5000$ ). Este intervalo se puede calcular por el "segmento acotado":

$$u(\text{FORMA "U"}) = \pm \frac{a}{\sqrt{2}} \approx \pm 0,7072 \cdot a$$

Esta es una *incertidumbre estándar* para esta distribución.

## VI) Distribución *t* de Student:

**VI.1)** La frecuencia máxima para las distribuciones específicas, dependen del número de grados de libertad ( $\nu$ ); generalmente son más achatadas que la distribución normal, a la que tiende solamente cuando  $\nu$  tiende al  $+\infty$ .

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 88 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

**VI.2)** El área normalizada, se obtiene por integración de la función suave y continúa, en todo el intervalo de variación de  $t$  desde  $-\infty$  hasta  $+\infty$ , para cada  $\nu$  constante ( $\nu = n - 1$ ):

$$t = \frac{(x - x_m)}{s} = \frac{(x - x_m)}{s} \cdot \sqrt{n}$$

$$\text{área normalizada} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt = 1$$

**VI.3)** En esta distribución entre  $\pm 1$  una desviación estándar (cuando esta existe para  $\nu > 2$ ), se encuentran el 68,27 % de los datos ( $p = 0,6827$ ). Este intervalo se puede calcular por la "desviación estándar expandida", de acuerdo con el producto:

$$u(\text{t de STUDENT}) = \pm t(0; 0,6827) \cdot s$$

Esta es una *incertidumbre estándar* para esta distribución.

### A3.2) Ley aditiva de la varianza y su relación con la incertidumbre combinada

El objetivo de "estandarizar" o normalizar todas las fuentes de incertidumbre y los correspondientes estimadores, calculando las *incertidumbres estándar*, se debe a que la convolución matemática de las distribuciones lleva a una ley estadística, la cual se denomina Ley de aditividad de la varianza. Debe recordarse, que una vez centrada en el origen de coordenadas (es decir,  $f_{\max}(x = 0)$  o en algunos pocos casos  $f_{\min}(x = 0)$ ), como por ejemplo para la distribución en forma de "U" y una vez normalizada el área unitaria; matemáticamente la varianza de toda distribución está determinada por la siguiente integral (calculada entre los límites correspondientes para cada distribución):

$$\sigma^2 = \int x^2 \cdot f(x) dx$$

La ley aditiva de la varianza, establece que la convolución de dos o más distribuciones ( $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ , ... ,  $f_N(x)$ ), implica que se puede sumar sus varianzas ( $\sigma_1^2$ ,  $\sigma_2^2$ ,  $\sigma_3^2$ , ... ,  $\sigma_N^2$ ) para "combinarlas":

$$f_T(x) = f_1(x) \otimes f_2(x) \otimes f_3(x) \otimes \dots \otimes f_N(x)$$

$$\sigma_T^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \dots + \sigma_N^2$$

Es por lo anterior que todos los segmentos definidos anteriormente para cada distribución como las "incertidumbres estándar", son importantes, pues corresponden a la raíz cuadrada de la varianza para cada distribución. Como la raíz cuadrada de la varianza se denomina *desviación estándar de la distribución* ( $\sigma_i = \sqrt{\sigma_i^2}$ ), cada uno de los segmentos se denomina *incertidumbre estándar* ( $u_i = +\sigma_i$ ). Esto lleva directamente a la fórmula simple (sin considerar correlaciones y para coeficientes de sensibilidad unitarios), de la Ley de combinación de incertidumbres:

$$u_c^2 = u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + \dots + u_N^2$$



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 89 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

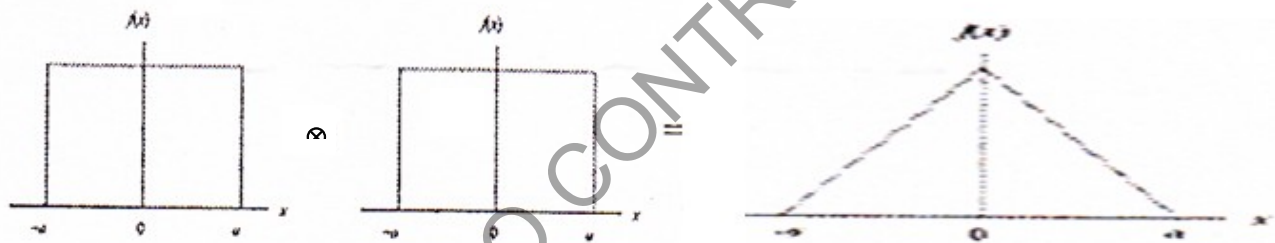
### A3.3) Convolución de distribuciones y Teorema del Límite Central:

De la misma forma que la convolución de las distribuciones lleva a la ley de la aditividad de la varianza, se puede demostrar también otro resultado importante en la convolución de funciones de distribuciones, denominado como Teorema del límite Central.

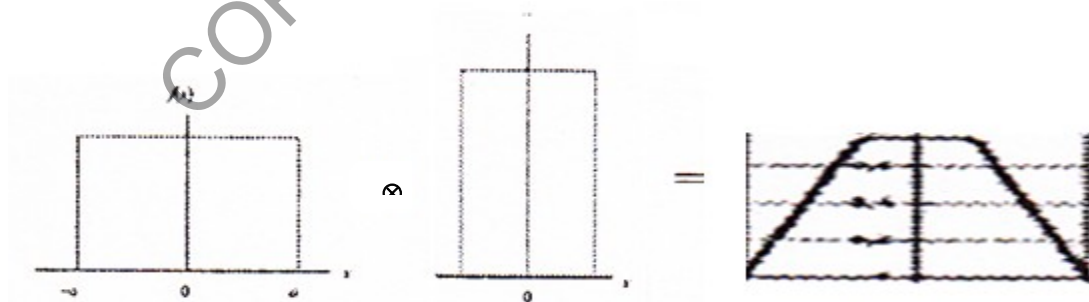
Este teorema establece que sin importar la distribución de una variable aleatoria, la distribución de la población de promedios de muchas muestras de esa variable presentará una distribución normal.

Esto tiene implicaciones importantes para los casos en los que las fuentes de incertidumbre son de la "misma" magnitud aproximada, es decir cuando para todas las distribuciones que se convolucionan o las varianzas que se combinan, el semi-intervalo o parámetro de media escala "a" es similar en magnitud o dimensión de la escala para las diferentes fuentes de incertidumbre.

Se puede establecer por ejemplo, que la convolución de dos distribuciones rectangulares iguales en amplitud, dan como resultado una distribución triangular del doble de amplitud:



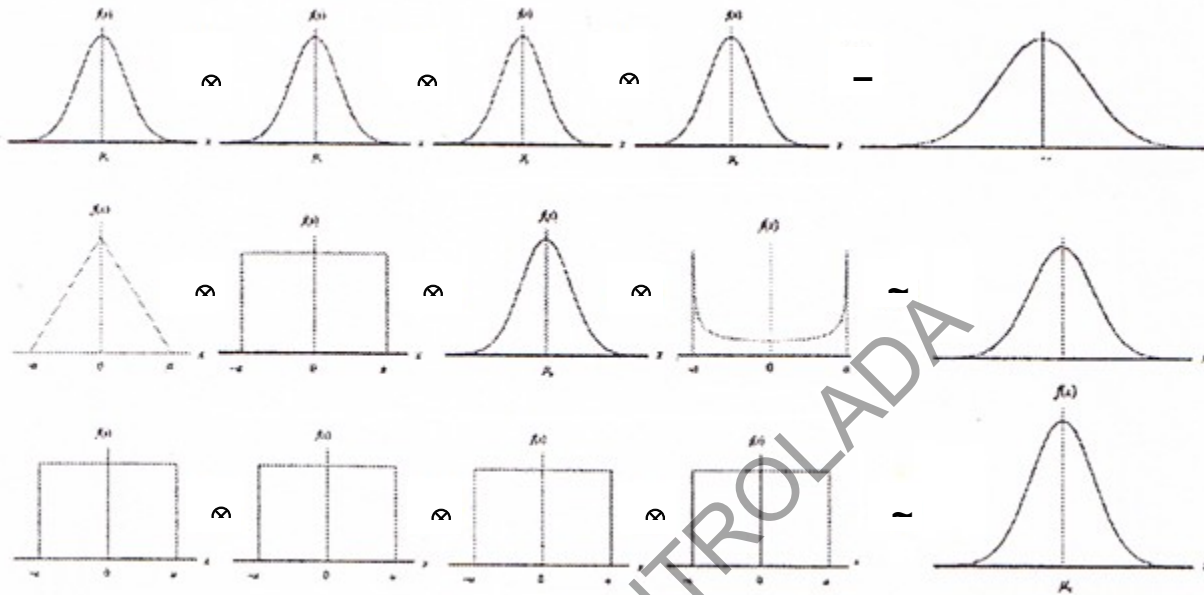
Sin embargo si las rectangulares son diferentes en amplitud, la convolución da como resultado una trapezoidal:



En este caso, la amplitud de la base mayor (segmento horizontal inferior), es la suma de las amplitudes de las dos distribuciones, mientras que la amplitud de la base menor (segmento horizontal superior), es la resta de las amplitudes de las dos distribuciones. En realidad, esto también aplica para el caso de la convolución de dos rectangulares similares, como se puede apreciar mentalmente, si se conoce que la triangular resultante tiene el doble de amplitud de las rectangulares en la base y amplitud nula en su centro.

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 90 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

De manera general, se pueden establecer las siguientes aproximaciones de convolución para la combinación de varias distribuciones de diferentes tipos:



Obsérvese que solamente la convolución de distribuciones normales lleva a una distribución normal (primer ejemplo de la figura anterior, en la que las cuatro normales de igual amplitud, llevan a una normal con una amplitud de 4 veces la amplitud de las componentes). Por otro lado, la convolución de otros tipos de distribuciones llevan a distribuciones resultantes que solo son aproximadamente normales (segundo y tercer ejemplo de la figura anterior, cuyas resultantes formalmente son funciones de polinomios. Las funciones de polinomios solamente se aproximan a la normal cuando son muchos los términos de polinomios en la expresión de la función resultante de las operaciones de convolución, tal como es de esperar por lo que establece el Teorema del Límite Central. En resumen conceptual, este teorema establece que para la combinación de muchas componentes o fuentes de variación (combinación de componentes o convolución de sus distribuciones), la distribución resultante siempre muestra una mayor frecuencia para las dispersiones pequeñas, que para las dispersiones grandes, ver por ejemplo las figuras de las convoluciones de dos rectangulares iguales, dos rectangulares diferentes (ambas en la página anterior) y las tres convoluciones de la figura anterior (en esta página).

Se pueden realizar convoluciones numéricas por medio de la aplicación en la página <https://uncertainty.nist.gov/>.

#### **A3.4) Factores de cobertura para las distribuciones predominantes:**

Uno de los pasos importantes, luego de combinar todas las incertidumbres, es elegir la probabilidad de cobertura o la probabilidad de confianza que se utilizará para obtener la incertidumbre expandida final. Esta probabilidad está directamente influenciada por el campo de aplicación del resultado y en algunos casos ya es parte de la metrología legal (ya está normado o reglamentada la probabilidad de cobertura y por lo tanto el factor también), pero en otros puede ser definida con criterios más flexibles. En metrología científica se reportan

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 91 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

incertidumbres con una probabilidad de cobertura del 68,27 % ( $p = 0,6827$ ), en variables eléctricas es muy común reportar las incertidumbres con una probabilidad de cobertura del 95,00 % ( $p = 0,9500$ ), en algunos campos de limitación reglamentaria se utilizan probabilidades de cobertura de 99,72 % ( $p = 0,9972$ ), y de forma general el criterio más utilizado es una probabilidad de cobertura del 95,45 % ( $p = 0,9545$ ), tal como lo establece el ente acreditador en su política. Por lo tanto, tal y como se definió en el cuerpo del procedimiento, para aplicaciones en el DCF, este valor no puede ser menor al 95,45 % ( $p = 0,9545$ ), aunque puede seleccionarse un valor mayor.

En cualquiera de esos campos, una vez elegida la probabilidad de cobertura, el factor de cobertura queda determinado en función de dos aspectos relacionados entre sí:

- del tipo de distribución dominante o el tipo de distribuciones predominantes,
- del número de grados de libertad efectivos para la estimación, en algunos casos particulares.

Es así como el factor de cobertura se estima según los siguientes criterios para la distribución final resultante:

**I) Distribución normal:**

En este caso el factor de cobertura depende de la probabilidad de cobertura ( $p$ ), de forma que:

$$k = z(p)$$

*Cuadro I-A3. Valores del factor  $k$  para la distribución normal estándar*

Probabilidad ( $p$ )	Factor de cobertura, $k = z(p)$
<b>0,6827</b>	1,00
<b>0,9000</b>	1,64
<b>0,9500</b>	1,96
<b>0,9545</b>	2,00 <sup>1</sup>
<b>0,9750</b>	2,24
<b>0,9972</b>	3,00
<b>0,9990</b>	3,29
<b>0,9999</b>	3,72
<b>0,999937</b>	4,00

<sup>1</sup>El valor mínimo utilizado en aplicaciones del DCF.

**II) Distribución rectangular:**

En este caso, para un valor de probabilidad ( $p$ ) definido; implica que:

$$k = p \cdot \sqrt{3}$$

**III) Distribución triangular:**

En este caso, para un valor de probabilidad ( $p$ ) definido; implica que;

$$k = (1 - \sqrt{1-p}) \cdot \sqrt{6}$$

**IV) Distribución trapezoidal:**

En este caso, hay dos posibilidades para valores de probabilidad ( $p$ ) y de  $\beta = A/B$  definidos:

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 92 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

- Si  $\beta$  es mayor al cociente  $p/(2-p)$ ; implica que:

$$k = \left[ \frac{p \cdot (1 + \beta)}{2 \cdot \sqrt{(1 + \beta^2)}} \right] \cdot \sqrt{6}$$

- Si  $\beta$  es menor o igual al cociente  $p/(2-p)$ ; implica que:

$$k = \left[ \frac{(1 - \sqrt{(1-p) \cdot (1-\beta^2)})}{\sqrt{(1 + \beta^2)}} \right] \cdot \sqrt{6}$$

**V) Distribución *t* de Student:**

En este caso el valor de *t* es el equivalente valor de *k*. El valor de *t* depende de la probabilidad (*p*) y los grados de libertad totales ( $\nu_T$ ) y se obtiene del siguiente cuadro (o de tablas estadísticas para los grados de libertad correspondientes, o calculado con las funciones de las hojas de cálculo comunes):

$$k = t(\nu_T, p)$$

**Cuadro II-A3.** Valores del factor *k* para la distribución *t* de Student

Grados de libertad ( $\nu_T$ )	Factor de cobertura, $k = t(\nu_T, p)$				
	Probabilidad de cobertura ( <i>p</i> )				
	0,682 7	0,900 0	0,950 0	0,954 5	0,997 2
1	1,84	6,31	12,71	13,97	235,78
2	1,32	2,92	4,30	4,53	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	4,28
9	1,06	1,83	2,26	2,32	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,96
20	1,03	1,72	2,09	2,13	3,42
30	1,02	1,70	2,04	2,09	3,27
40	1,01	1,68	2,02	2,06	3,20
50	1,01	1,68	2,01	2,05	3,16
60	1,01	1,67	2,00	2,04	3,13
70	1,01	1,67	1,99	2,04	3,11
80	1,01	1,66	1,99	2,03	3,10
90	1,01	1,66	1,99	2,03	3,09
100	1,01	1,66	1,98	2,03	3,08
$\infty$	1,00	1,64	1,96	2,00	3,00

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 93 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Los valores de *t de Student* para todas las probabilidades del cuadro anterior corresponden a dos colas. Además, los valores de *t de Student* para la probabilidad de  $p = 0,6827$  del cuadro anterior, son útiles para corregir la desviación estándar de mediciones directas, cuando la repetibilidad no sea predominante (importancia menor al 33,33 %) y el número de réplicas o repeticiones es menor a 10 (grados de libertad  $\nu$ , con valores entre 1 y 9). En este caso, puede considerarse que no se tiene una buena estimación de la desviación estándar como estimador de la incertidumbre estándar, por lo que se debe corregir su valor. Para esto, la dispersión de los datos, la dispersión del promedio o la incertidumbre estándar se debe multiplicar, por el factor de *t de Student* de la segunda columna del cuadro anterior, para el grado de libertad correspondiente, antes de combinarla con las demás fuentes, es decir:

$$s_{\text{ corregida}} = t(\nu; 0,6827) \cdot s$$

$$s_{m, \text{ corregida}} = t(\nu; 0,6827) \cdot s_m$$

$$u_{\text{ corregida}} = t(\nu; 0,6827) \cdot u_{\text{ Rep}}$$

Esto amplía levemente la estimación de la incertidumbre combinada, corrigiendo el efecto de pocos grados de libertad en esa fuente o componente (no es una práctica establecida en la *GUM 2008*, pero que puede justificarse estadísticamente siempre que no tenga efectos de amplificación en el momento que se estime la incertidumbre expandida).

Para la elaboración de este anexo se utilizaron todas las referencias bibliográficas indicadas en el apartado 3. Referencias de este Procedimiento de Operación Normado).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 94 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

## Anexo Número 04

### Herramientas estadísticas útiles para la estimación de incertidumbres de "arriba hacia abajo"

#### A5.1) Cartas de Control (Diagramas de Shewhart)

Si en el control estadístico de la metodología se tiene un diagrama de Shewhart para el valor medio de un mensurando (del tipo  $\bar{x} - s$  o promedio - dispersión), con límites de precaución a un 95,45 % de confianza (2 sigma) y límites de acción a 99,72 % de confianza (3 sigma), los límites anteriores se pueden utilizar como estimadores de la incertidumbre, pues corresponden a múltiplos de una desviación estándar. Eso sí, se deben cumplir las siguientes restricciones:

- La carta de control debe realizarse con un material de referencia certificado o de valor verdadero convencional o aceptado. Esto asegura que el sesgo se encuentra bajo control, y que cuando aparezca va a ser corregido o eliminado. En la corrección del sesgo debe considerarse que la corrección tiene una incertidumbre, por lo que puede ser necesario cuantificarla y sumarla cuadráticamente con la desviación estándar utilizada para definir los límites de decisión.
- El valor del mensurando en las muestras de análisis debe ser muy similar al valor verdadero convencional de la muestra certificada. Esto hace necesario la adquisición de varios materiales de referencia certificados para metodologías de ámbitos amplios del mensurando.
- El procedimiento aplicado sobre las muestras de análisis y el material de referencia debe ser exactamente el mismo (esto a veces no se cumple para la reducción de la muestra y la propia preparación de la muestra). Cuando lo anterior no se cumple, es necesario considerar las fuentes de incertidumbre correspondientes (aplicando una parte del método GUM-2008 establecido en el procedimiento 7.2).
- El proceso de medida debe estar bajo control estadístico demostrado por la carta de control. Debe tenerse la suficiente información estadística en la elaboración de la carta de control. Aunque no hay reglas universalmente aceptadas, normalmente son necesarias de 20 a 25 grupos, cada uno compuesto de 4 a 5 réplicas se consideran como adecuados para obtener los estimados preliminares. Los procesos de medida que no están bajo control estadístico, deben llevarse a control antes de elaborar la carta de control apropiada.

#### A5.1) Estudios de repetibilidad y Reproducibilidad ( $s_r$ & $s_R$ )

Si el laboratorio participa en Ensayos de Colaboración (EC) o Ensayos de Suficiencia (ES), con relación a métodos oficiales o estándar aprobados por organismos internacionales, y con base a los resultados de sus participaciones, puede demostrar que:

- El sesgo obtenido cuando aplica el método aprobado se encuentra dentro del sesgo establecido por el organismo para el método de ensayo, y
- La reproducibilidad ( $s_R$ ), obtenida cuando aplica el método aprobado (para varios instrumentos, operadores, diferentes días, etc.), se encuentra dentro de la desviación

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 95 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

estándar entre diferentes laboratorios ( $s_R$  reportada por el organismo, tener cuidado de no confundir el valor de Reproducibilidad al 95%,  $R = 2,8 \cdot s_R$ , con el valor de dispersión correspondiente), y

- Es capaz de identificar cualquier magnitud de influencia que pueda no haber sido considerada en el estudio inter-laboratorios de colaboración, cuantificar su contribución mediante la estimación de su incertidumbre estándar y el correspondiente coeficiente de sensibilidad (aplicando parte del método *GUM-2008* establecido en el procedimiento 7.2)

El laboratorio puede estimar su incertidumbre, combinando la incertidumbre asociada a la corrección del sesgo, su reproducibilidad y las incertidumbres de las magnitudes de influencia adicionales (tercer punto anterior), por medio de la Ley de propagación de incertidumbres. Para esto debe cumplir concomitantemente con lo que se establece en los procedimientos de Control del Sesgo y de Control de Precisión, que se detallan a continuación, además de demostrar que históricamente y continuamente mantiene el control, con diagramas de Shewhart incluidos (utilizando materiales certificados en el mismo nivel que sus muestras).

Otra opción, es el uso de herramientas estadísticas como el ANOVA de uno o de dos factores, para establecer los parámetros de repetibilidad o de reproducibilidad, o de precisiones establecidas en los diseños experimentales.

### **A5.3) Control del Sesgo (Estudio de "BIAS")**

Si se participa en estudios de aptitud o estudios de colaboración, o se utiliza un material de referencia certificado, se puede demostrar que las fuentes de incertidumbre que se tienen en el proceso de medición, tienen efectos no significativos, cuando:

- El valor obtenido para el mensurando al utilizar el procedimiento de medición sobre replicados del material de referencia certificado, da como resultado de medida o una medida materializada que se encuentra dentro de la incertidumbre reportada para el material certificado (autocontrol externo). Otra alternativa menos rigurosa, es demostrar que la diferencia entre el resultado de medida y el valor del material de referencia certificado, es menor que dos veces la dispersión de reproducibilidad para el procedimiento de medición obtenida en el propio laboratorio en la validación (autocontrol interno, a menos que el método sea oficial o estándar y se compare contra la reproducibilidad, reportada por el organismo, tener cuidado de no confundir el valor de Reproducibilidad al 95%,  $R = 2,8 \cdot s_R$ , con el valor de dispersión correspondiente). Cualquiera de los anteriores, asegura que el sesgo está bajo control.
- El valor reportado para la muestra del estudio de aptitud o estudio de colaboración, debe encontrarse dentro de  $\pm 2$  en el informe del Z "score" para el estudio correspondiente. Esto asegura que el sesgo está bajo control; entre menor valor absoluto de ese parámetro, mayor control se tiene sobre el sesgo. Además, valores entre  $\pm 1$  y el límite de  $\pm 2$ , pueden implicar la necesidad de tomar medidas preventivas voluntariamente, mientras que valores fuera del límite de  $\pm 2$ , implican la necesidad de ejecutar medidas correctivas obligatoriamente.

En el caso del control de Sesgo, se puede considerar la evaluación consistente de los porcentajes de recuperación (su confirmación dentro de los límites aceptables) junto con su evaluación estadística por medio de una prueba t, para verificar si el valor es diferente de uno (expresado en fracción unitaria).

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 96 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

Alternativamente, para otros tipos de sesgos diferentes a las recuperaciones, se puede obtener un intervalo por medio de una distribución rectangular (de la misma forma que se establecen las incertidumbres por deriva) o mediante el cálculo por medio de la RMS (raíz cuadrática media, o promedio cuadrático) a través del tiempo.

#### **A5.4) Control de la Precisión (Estudio de repetibilidad)**

Si se participa en estudios de aptitud o estudios de colaboración, o se utiliza un material de referencia certificado, se puede demostrar que las fuentes de incertidumbre que se tienen en el proceso de medición, tienen efectos no significativos, cuando:

- El valor para la dispersión del mensurando del material de referencia certificado obtenido a partir de un número de replicados bajo condiciones de repetibilidad en el laboratorio ( $s_{lab}$ ) es menor al valor reportado como incertidumbre estándar para el material de referencia certificado (autocontrol externo). Otra alternativa menos rigurosa, es demostrar que la dispersión del resultado sobre el material de referencia, es menor que la dispersión de reproducibilidad para el procedimiento de medición obtenida en el propio laboratorio en la validación (autocontrol interno). Para las comparaciones se debe utilizar la prueba F de Snedecor, con el estadístico F de Fisher, siempre a un nivel de 95%.
- El valor para la dispersión del mensurando del material de referencia certificado, obtenido a partir de un número de replicados bajo condiciones de repetibilidad ( $s_{lab}$ ) no es significativamente diferente al valor reportado como  $s_r$  (repetibilidad, tener cuidado de no confundir el valor de repetibilidad al 95%,  $r = 2,8 \cdot s_r$ , con el valor de dispersión correspondiente), por el organismo para el método oficial o el método estándar. Para esta comparación se debe utilizar la prueba F de Snedecor, con el estadístico F de Fisher, siempre a un nivel de 95%.

Cualquiera de los anteriores, asegura que la precisión está bajo control. Si  $s_{lab}$  es menor que la incertidumbre estándar del material de referencia certificado, o similar a  $s_r$ , se puede utilizar  $s_{lab}$  como estimador de incertidumbre, pero si no es así, se debe utilizar o la incertidumbre estándar del material de referencia certificado o el propio valor de  $s_r$  reportado por el organismo internacional.

En el caso del control de la Precisión, se puede considerar la evaluación consistente de los valores de dispersión (su confirmación dentro de los límites aceptables, por ejemplo de acuerdo con los criterios de Horwits y el *HORRAT*) junto con su evaluación estadística por medio de una prueba F, para verificar si los valores son consistentes y poder determinar si se utilizan los valores de los factores de repetibilidad ( $F_r$ ) y de reproducibilidad ( $F_R$ ).

#### **A5.5) Control de la Precisión y el Sesgo (Estudios de Suficiencia y Colaboración)**

Una forma de realizar conjuntamente lo establecido en el apartado A5.3 y A5.4, es participar en ensayos interlaboratoriales luego de validar los parámetros de desempeño de las metodologías de análisis, de forma que se utilice la gran cantidad de información que se obtiene de la participación de este tipo de ensayos. Al respecto se recomienda consultar el apartado 7.6 de *EURACHEM/CITAC* (2012) o la guía *ISO/NT 21748: 2004*.



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FORENSES	VERSIÓN 06	PAGINA: 97 de 103
PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE LOS ANÁLISIS FORENSES	P-DCF-ECT-JEF-06	

### Anexo Número 05

#### Formulario de Presupuesto de incertidumbres, Ejemplo correspondiente de Registros

En las páginas siguientes, se presenta el Formato del Cuadro general de presupuesto de incertidumbres general para una estimación, seguido de un ejemplo para comprender mejor el llenado del mismo, además al final se establece el formato del Formulario para el presupuesto de incertidumbres.

Como se puede apreciar del formato y los datos del ejemplo, para un mensurando de una medición directa, se utiliza el número arábigo 1 para el mensurando, y a cada una de sus fuentes primarias, se les coloca el numeral compuesto con el número arábigo 1 y una letra mayúscula: 1A, 1B, 1C, etc., tantas como fuentes de incertidumbre se consideren. Como cada una de estas fuentes primarias puede componerse de varias componentes secundarias, para estas se pueden utilizar numerales compuestos por el número arábigo 1, letras mayúsculas y números romanos: 1BI, 1BII, etc. (usando la fuente 1B como ejemplo).

Con relación al ejemplo, relacionado con la determinación de la concentración de un analito  $x$  ( $C_x$ ) en una muestra de un alimento homogéneo (no hay incertidumbre por muestreo o es despreciable), obsérvese que los grados de libertad efectivos se pueden mantener con dos decimales, mientras que el cálculo final de grados de libertad se debe redondear al entero menor, y por lo tanto debe reportarse y utilizarse (para obtener el factor de cobertura como la *t de Student*), sin decimales. Al utilizar el entero menor, el factor de cobertura será el mayor valor posible (ampliando la seguridad del intervalo estimado).

Los grados de libertad de las componentes de correlación de variables correlacionadas, "simultáneas" o concomitantes, siempre son iguales a los grados de libertad de las variables que se demuestran como correlacionadas. Para esto no se utiliza la fórmula de Welch-Satterthwaite.



**PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRES**

**Cuadro I-A5.** Presupuesto de incertidumbres general para una estimación

<b>N<sup>o</sup></b>	<b>Magnitud de entrada (X<sub>i</sub>) Fuente de incertidumbre</b>	<b>Valor estimado (x<sub>i</sub>)</b>	<b>Fuente de información</b>	<b>Estimador de Incertidumbre</b>	<b>Tipo de distribución</b>	<b>Incertidumbre estándar u<sub>i</sub>(x)</b>	<b>Coefficiente de sensibilidad c<sub>i</sub>(Y)</b>	<b>Contribución u<sub>i</sub>(y)</b>	<b>Grados Libertad</b>
<b>0</b>	<b>Mensurando (Y)</b>	y <sub>m</sub>	-	-	Dist. de Y	u <sub>c</sub> (y)	1	u <sub>c</sub> (y)	v <sub>T</sub>
<b>1</b>	<b>Variable entrada 1 (X<sub>1</sub>)</b>	x <sub>m1</sub>	-	-	Dist. de X <sub>1</sub>	u <sub>c</sub> (X <sub>1</sub> )	c <sub>X1</sub> (Y)	u <sub>c</sub> (X <sub>1</sub> )•c <sub>X1</sub> (Y)	v <sub>efec</sub> (1)
<b>1 A</b>	<b>Componente A sobre X<sub>1</sub></b>	-	Fuente de 1A	Valor de 1A	Dist. de 1A	u <sub>A</sub> (X <sub>1</sub> )	c <sub>A</sub> (X <sub>1</sub> )	u <sub>A</sub> (X <sub>1</sub> )•c <sub>A</sub> (X <sub>1</sub> )	v(1A)
<b>1 B</b>	<b>Componente B sobre X<sub>1</sub></b>	-	Fuente de 1B	Valor de 1B	Dist. de 1B	u <sub>B</sub> (X <sub>1</sub> )	c <sub>B</sub> (X <sub>1</sub> )	u <sub>B</sub> (X <sub>1</sub> )•c <sub>B</sub> (X <sub>1</sub> )	v(1B)
<b>1 C</b>	<b>Componente C sobre X<sub>1</sub></b>	-	Fuente de 1C	Valor de 1C	Dist. de 1C	u <sub>C</sub> (X <sub>1</sub> )	c <sub>C</sub> (X <sub>1</sub> )	u <sub>C</sub> (X <sub>1</sub> )•c <sub>C</sub> (X <sub>1</sub> )	v(1C)
<b>2</b>	<b>Variable entrada 2 (X<sub>2</sub>)</b>	x <sub>m2</sub>	-	-	Dist. de X <sub>2</sub>	u <sub>c</sub> (X <sub>2</sub> )	c <sub>X2</sub> (Y)	u <sub>c</sub> (X <sub>2</sub> )•c <sub>X2</sub> (Y)	v <sub>efec</sub> (2)
<b>2 A</b>	<b>Componente A sobre X<sub>2</sub></b>	-	Fuente de 2A	Valor de 2A	Dist. de 2A	u <sub>A</sub> (X <sub>2</sub> )	c <sub>A</sub> (X <sub>1</sub> )	u <sub>A</sub> (X <sub>2</sub> )•c <sub>A</sub> (X <sub>2</sub> )	v(2A)
<b>2 B</b>	<b>Componente B sobre X<sub>2</sub></b>	-	Fuente de 2B	Valor de 2B	Dist. de 2B	u <sub>B</sub> (X <sub>2</sub> )	c <sub>B</sub> (X <sub>1</sub> )	u <sub>B</sub> (X <sub>2</sub> )•c <sub>B</sub> (X <sub>2</sub> )	v(2B)
<b>3</b>	<b>Variable entrada 3 (X<sub>3</sub>)</b>	x <sub>m3</sub>	Fuente de 3	Valor de 3	Dist. de X <sub>3</sub>	u(X <sub>3</sub> )	c <sub>X3</sub> (Y)	u(X <sub>3</sub> )•c <sub>X3</sub> (Y)	v(3)



<b>4</b>	<b>Correlación (<math>X_I, X_{II}</math>)</b>	$r(x_I, x_{II}) = R$	Análisis	Compuesto	Normal	$s(x_I) \cdot s(x_{II}) = S$	$2 \cdot C_{X_I}(Y) \cdot C_{X_{II}}(Y) = T$	$T \cdot R \cdot S$	$v(r)$
<b>4 A</b>	<b>Repetibilidad de <math>x_I</math></b>	-	Datos	Valor de $s(x_I)$	Normal	$s(x_I)$	1	-	$v(x_I)$
<b>4 B</b>	<b>Repetibilidad de <math>x_{II}</math></b>	-	Datos	Valor de $s(x_{II})$	Normal	$s(x_{II})$	1	-	$v(x_{II})$

**NOTAS:**

Realizar anotaciones particulares de la estimación, si es posible referenciadas como notas de Cuadros.

**Función de medición:**

Incluir aquí una figura o una ecuación que ayude a esclarecer la estimación realizada y resumida en el cuadro. Por ejemplo:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3)$$

**RESUMEN DE RESULTADOS**

<b>Resultado del mensurando, <math>Y =</math></b>	Resultado	Unidades
<b>Incertidumbre combinada, <math>u_c(y) =</math></b>	Combinación	Unidades
<b>Probabilidad de cobertura, <math>p =</math></b>	Valor de la probabilidad	
<b><math>k</math> (<math>v_T = \text{valor}; p = \text{valor}; \text{Dist. de } Y =</math></b>	Valor del factor	
<b>Incertidumbre expandida, <math>U(y) =</math></b>	Estimación	Unidades



**PRESUPUESTO DE INCERTIDUMBRES**

**Cuadro II-A5.** Presupuesto de incertidumbres general para la determinación de Concentración de un analito en una muestra de alimento

<b>N<sup>o</sup></b>	<b>Magnitud de entrada (<math>X_i</math>) Fuente de incertidumbre</b>	<b>Valor estimado (<math>x_i</math>)</b>	<b>Fuente de información</b>	<b>Estimador de Incertidumbre</b>	<b>Tipo de distribución</b>	<b>Incertidumbre estándar <math>u_i(x)</math></b>	<b>Coefficiente de sensibilidad <math>c_i(Y)</math></b>	<b>Contribución <math>u_i(y)</math></b>	<b>Grados Libertad</b>
<b>0</b>	<b>Concentración (<math>C_x</math>)</b>	1,058 2	-	-	t Student	0,008 970	1	0,008 970	7
<b>1</b>	<b>Absorbancia muestra (<math>A_m</math>)</b>	0,390 7	-	-	Normal	0,003 017	2,708	0,008 170	5,26
<b>1 A</b>	<b>Repetibilidad (correl.*)</b>	-	Datos	0,007 285	normal	0,002 975	1	0,002 975	5
<b>1 B</b>	<b>Trazabilidad</b>	-	Certificado	0,001	normal	0,000 500 0	1	0,000 500 0	50
<b>2</b>	<b>Pureza (<math>P</math>)</b>	0,985	Certificado	0,003	Rectangular	0,001 732	1,074	0,001 860	$\infty$
<b>3</b>	<b>Absorbancia estándar (<math>A_{std}</math>)</b>	0,456	Certificado	0,001	Normal	0,000 500 0	2,321	0,001 161	50
<b>4</b>	<b>Volumen final (<math>V_f</math>)</b>	50,00	-	-	Normal	0,030 69	0,021 16	0,000 649 4	$\infty$
<b>4 A</b>	<b>Tolerancia balón 50 mL</b>	-	Fabricante	0,06	triangular	0,024 50	1	0,024 50	$\infty$
<b>4 B</b>	<b>Efecto de temperatura</b>	-	$\alpha(\Delta T)$	0,032	rectangular	0,018 48	1	0,018 48	$\infty$
<b>5</b>	<b>Masa de muestra</b>	25,282 5	-	-	Normal	0,014 65	0,041 86	0,000 613	5,00



	(m <sub>m</sub> )								
<b>5 A</b>	<b>Repetibilidad (correl.)*</b>	-	Datos	0,035 87	normal	0,014 65	1	0,014 65	5
<b>5 B</b>	<b>Error por linealidad, CN</b>	-	Certificado	0,000 1	Rectangular	0,000 057 74	1	0,000 057 74	∞
<b>5 C</b>	<b>Trazabilidad</b>	-	Certificado	0,000 1	normal	0,000 050 00	1	0,000 050 00	50
<b>6</b>	<b>Volumen estándar (V<sub>std</sub>)</b>	100,00	-	-	Normal	0,054 68	0,010 58	0,000 578 5	∞
<b>6 A</b>	<b>Tolerancia balón 50 mL</b>	-	Fabricante	0,10	triangular	0,040 83	1	0,040 83	∞
<b>6 B</b>	<b>Efecto de temperatura</b>	-	α(ΔT)	0,063	rectangular	0,036 37	1	0,036 37	∞
<b>7</b>	<b>Masa de estándar (m<sub>std</sub>)</b>	0,634 0	-	-	Normal	0,000 076 38	1,669	0,000 127 5	272,28
<b>7 A</b>	<b>Error por linealidad, CN</b>	-	Certificado	0,000 1	Rectangular	0,000 057 74	1	0,000 057 74	∞
<b>7 B</b>	<b>Trazabilidad</b>	-	Certificado	0,000 1	normal	0,000 050 00	1	0,000 050 00	50
<b>8</b>	<b>Correl.** (m<sub>m</sub>, A<sub>m</sub>)</b>	0,786 0	Análisis	Compuesto	Normal	0,000 043 58	0,226 7	0,000 007 765	5
<b>8 A</b>	<b>Repetibilidad de m (5A)</b>	-	Datos	0,035 87	normal	0,014 65	1	0,014 65	5



<b>8 B</b>	<b>Repetibilidad de A<sub>m</sub> (1A)</b>	-	Datos	0,007 285	normal	0,002 975	1	0,002 975	5
------------	--	---	-------	-----------	--------	-----------	---	-----------	---

**NOTAS:**

\* Estas variables se encuentran correlacionadas.

\*\* El valor de correlación no se emplea como argumento en la función de medición, se usa solamente en la contribución a la incertidumbre combinada de C<sub>x</sub>.

\*\* La incertidumbre estándar de esta contribución, se estima como la multiplicación de las incertidumbres estándar correlacionadas.

\*\* El coeficiente de sensibilidad de esta contribución es 2 veces la multiplicación de los coeficientes de sensibilidad de las contribuciones correspondientes.

\*\* La contribución correspondiente se obtiene de la multiplicación de las columnas de correlación, incertidumbre estándar y coeficiente de sensibilidad de la línea.

No se están despreciando las fuentes no importantes en la estimación.

**Función de medición**

$$C_x = \frac{A_m \cdot V_f \cdot m_{std} \cdot P \cdot 100}{A_{std} \cdot m_m \cdot V_{std}}$$

**RESUMEN DE RESULTADOS**

<b>Concentración, C<sub>x</sub> =</b>	1,058	g/100g
<b>Incertidumbre combinada, u<sub>c</sub>(C<sub>x</sub>) =</b>	0,009 0	g/100g
<b>Probabilidad de cobertura, p =</b>	0,954 5	
<b>k (v<sub>T</sub> = 7; p = 0,954 5; t de Student) =</b>	2,429	
<b>Incertidumbre expandida, U(C<sub>x</sub>) =</b>	0,022	g/100g