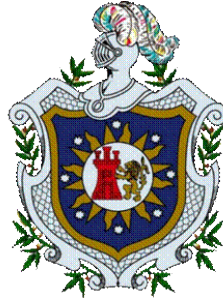


Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León
UNAN-León

Área de Conocimiento de Ciencias Y Tecnología
Área de Conocimiento Específico De Química



Trabajo Monográfico para optar al título de Licenciado en Química

Aplicación de la guía ISO GUM 2008 para el cálculo de incertidumbre en mediciones de conductividad eléctrica en agua potable.

Autores:

- Br. Karla Anahí Cruz Pérez
- Br. Ryder Alexander Medina Vargas

Tutor: Haylell Emilio Escoto López

2025:46/19 ¡Siempre más allá, Avanzamos en la Revolución!

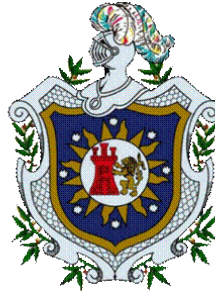


Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, León

UNAN-León

Área de Conocimiento de Ciencias Y Tecnología

Área de Conocimiento Específico de Química



Título del trabajo monográfico:

Aplicación de la guía ISO GUM 2008 para el cálculo de incertidumbre en mediciones de conductividad eléctrica en agua potable.

Autores:

- Br. Karla Anahí Cruz Pérez _____
- Br. Ryder Alexander Medina Vargas _____

Tutor: Haylell Emilio Escoto López _____

2025:46/19 ¡Siempre más allá, Avanzamos en la Revolución!



AGRADECIMIENTOS

Con la finalización de esta tesis, nos sentimos profundamente agradecidos por el apoyo y la orientación que hemos recibido a lo largo de este proceso.

En primer lugar, queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a Dios. Ya que él nos ha dado la fuerza y aliento durante todos los momentos difíciles de completar esta tesis. Estamos verdaderamente agradecidos por su amor, misericordia y gracias incondicionales e infinitos.

Así mismo agradecemos a nuestro tutor de tesis, Haylell Emilio Escoto López, por su invaluable guía, paciencia y apoyo constante. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo, y sus consejos han sido clave para superar los desafíos que surgieron en el camino.

A nuestros padres, por su amor incondicional, apoyo moral y paciencia durante todo este tiempo. Su comprensión y aliento han sido nuestra mayor fuente de motivación.

A nuestros amigos y compañeros de estudio, por estar siempre dispuestos a ayudar, compartir ideas y ofrecer apoyo en los momentos más difíciles. Las conversaciones y el trabajo en equipo han sido una parte esencial de esta experiencia.

A nuestros maestros, por sus enseñanzas para desarrollarnos profesionalmente y habernos brindado todos los conocimientos a lo largo de nuestra carrera.

Finalmente, queremos reconocer a la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN - León, la cual nos proporcionó los recursos necesarios y un entorno propicio para llevar a cabo esta investigación. Sin el acceso a sus instalaciones y materiales, este proyecto no habría sido posible.

A todos ustedes, les debemos una gratitud inmensa. Este logro es el resultado de su apoyo y colaboración, y nos sentimos afortunados de haber contado con cada uno de ustedes en este recorrido.

Los Autores



DEDICATORIA

Dedicamos el presente trabajo monográfico a nuestras madres, cuya presencia en nuestras vidas ha sido una fuente constante de inspiración y apoyo, por su amor incondicional, paciencia y ánimo, que nos han sido fuente de perseverancia para superar cada desafío en este proceso. Sin su apoyo, los resultados positivos no habrían sido posibles.

A nuestros amigos y docentes, por sus palabras de aliento y sus valiosos consejos, que han sido guías y fuentes motivacionales en nuestro camino hacia la culminación de esta etapa en nuestras vidas.

Y a todos aquellos que, de una u otra forma, han contribuido a que este proyecto sea una realidad.

Esta tesis es el reflejo del esfuerzo compartido y del compromiso de quienes nos han acompañado en este viaje. A todos ustedes, dirigimos con mucho orgullo nuestro estudio monográfico.

Los Autores.



ÍNDICE

1	INTRODUCCION.....	7
2	OBJETIVOS	5
2.1	Objetivo general.....	5
2.2	Objetivos Específicos.....	5
3	MARCO TEORICO	6
3.1	El Agua	6
3.1.1	Tipos de agua	6
3.2	Calibración del material volumétrico	7
3.3	Método conductimétrico	9
3.4	Conductividad eléctrica.....	9
3.4.1	Conductancia.....	10
3.4.2	Conductancia especifica	11
3.4.3	Conductimetría	11
3.5	Error	12
3.5.1	Errores en mediciones analíticas.....	12
3.6	Desviación Estándar	13
3.7	Coeficiente de Varianza	13
3.8	Repetibilidad	13
3.8.1	Condiciones de repetibilidad.....	14
3.9	Intervalo de medida	14
3.10	Guía ISO GUM 2008	14
3.10.1	Mensurando.....	16
3.10.2	Definición del mesurando	16
3.10.3	Magnitud influyente.....	17
3.10.4	Modelo Matemático	17
	Distribución de Probabilidad	17
3.10.5	Las distribuciones más frecuentes son:.....	18
3.11	Incertidumbre	18
3.11.1	Incertidumbre analítica derivada del proceso analítico.	19
3.11.2	Incertidumbre de medida.....	19



3.11.3	Identificación de las fuentes de incertidumbre	19
3.11.4	Diagramas de causa y efecto o diagrama Ishikawa	20
3.11.5	Incertidumbre estándar.	21
3.11.6	Incertidumbre estándar relativa (U_{er}):	22
3.11.7	Incertidumbre estándar combinada (U_c):	22
3.11.8	Factor de Cobertura	22
3.11.9	Incertidumbre expandida (U_e):	22
3.11.10	Fuentes de incertidumbre en mediciones de masa.....	23
3.11.11	Fuentes de incertidumbre en mediciones con volumétricos.....	24
3.11.12	Fuentes de incertidumbre en materiales de referencia	25
3.11.13	Fuentes de incertidumbres asociadas a la preparación del KCl 0.1M.....	25
3.11.14	Fuente de incertidumbre del equipo conductimétrico.....	26
3.11.15	Fuente de incertidumbre en la medición de conductividad eléctrica.....	26
4	DISEÑO METODOLOGICO.....	28
4.1	Tipo de estudio: Estudio experimental.....	28
4.2	Población de estudio: Agua potable.....	28
4.3	Área de estudio: Ambiental. La presente investigación se desarrolló en la ciudad de León	28
4.4	Muestra.....	28
4.5	Recolección de muestra	28
4.6	Equipos, Reactivos, Cristalería y Materiales.....	28
4.7	Proceso de verificación de la calibración interna de la balanza analítica	29
4.8	Proceso de verificación de la calibración del material volumétrico	30
4.9	Preparación de la solución electrolito estándar de KCl 0.1M.....	31
4.10	Verificación de la respuesta del sistema conductimétrico	31
4.11	Procedimiento de medición de la conductividad eléctrica en la muestra de agua	31
4.12	Procedimiento para estimar la incertidumbre en una medición.....	32
5.	RESULTADOS Y DISCUSION	34
5.1	Verificación del buen funcionamiento de la balanza analítica	34
5.1.1	Prueba de repetibilidad.....	34
5.1.2.	Prueba de linealidad	35
5.1.3.	Cálculos de las incertidumbres asociadas a las pesadas con la balanza Sartorius AC210s	37
5.2.	Verificación de la calibración del matraz volumétrico PYREX de 100 mL	38



5.2.1.	Cálculos de las incertidumbres asociadas a la verificación de la calibración del matraz volumétrico marca Pyrex clase A de 100 mL.....	40
5.3.	Resultados del cálculo de la masa de KCl para la preparación de la solución electrolito estándar de KCl 0.0995M.....	40
5.3.1	Cálculos de los coeficientes de sensibilidad (C_i) asociados a la cantidad de masa de KCl	41
5.3.2.	Cálculo de la incertidumbre asociada a la masa de KCl	42
5.3.3.	Combinación de incertidumbres asociadas a la preparación de la solución de KCl 0.0995M 43	
5.4.	Resultados de la verificación de respuesta de la interfaz LabQuest1 con estándares de referencia	43
5.4.1.	Cálculo de incertidumbres asociadas a la interfaz LabQuest1 empleando soluciones de referencia de conductividad	45
5.4.2.	Resultados de la verificación de respuesta de la interfaz LabQuest1 con solución preparada de KCl 0.0995 M	45
5.4.3.	Cálculo de incertidumbres asociadas a la interfaz LabQuest1 empleando solución electrolítica preparada de KCl 0.0995M.....	47
5.5.	Mediciones de conductividad eléctrica en la muestra de agua potable	48
5.5.1.	Cálculo de las incertidumbres en la medición de la conductividad eléctrica en la muestra de agua	57
5.5.2.	Balance de incertidumbres del proceso de medición de conductividad eléctrica en la muestra de agua	58
5.6.	Estimación de la incertidumbre combinada en la medición de conductividad eléctrica en la muestra de agua CE_{Tx}	60
6.	CONCLUSIONES.....	63
7.	RECOMENDACIONES.....	64
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	65



RESUMEN

El presente trabajo monográfico se realizó con el objetivo de estimar la incertidumbre en la medición de la conductividad eléctrica en muestras de agua potable a través del enfoque GUM 2008.

Para esto fue necesario hacer una verificación de la calibración tanto de la balanza analítica como del matraz aforado, verificar las respuestas de la interfaz LabQuest1. Así mismo, se utilizaron estándares de referencia, se identificaron las fuentes de incertidumbre, se emplearon diagramas causa-efecto. Y se derivó un modelo matemático. En el proceso se identificaron y calcularon las fuentes de incertidumbre siguiendo el procedimiento general establecido en la guía ISO GUM 2008. Donde se aplicó la ley de propagación del error a las incertidumbres estándares para obtener la incertidumbre combinada. Finalmente se estimó la incertidumbre expandida empleando un factor de cobertura ***k*** de 1.96 asumiendo una distribución normal a un nivel de confianza del 95%, obteniendo así el intervalo de confianza para la conductividad eléctrica de la muestra de 297.19 ± 0.56 .



1 INTRODUCCION

Desde el principio de la historia el agua ha sido y continúa siendo esencial para la vida por sus múltiples usos y para el desarrollo, la cual la convierte en la matriz más ampliamente estudiada. Uno de estos parámetros es la conductividad eléctrica, la cual se relaciona directamente con la concentración de las sales disueltas, y cuya solubilidad depende de la temperatura, por lo que el valor de la conductividad varía de acuerdo con la temperatura del agua. (Solís-Castro et al., 2018).

La conductividad eléctrica, es una medida de la conducción de la electricidad. Por lo tanto, se define como la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones en solución. Y conforme aumenta la concentración de los iones se incrementa la conductividad. (Lenntech, 1993)

Por consiguiente, una forma de expresar confianza al reportar los valores de conductividad eléctrica, es acompañarla con su valor de incertidumbre asociado, tal que la incertidumbre es el “Parámetro asociado al resultado de una medida, que detalla la dispersión de los valores que razonablemente pueden ser atribuidos al mensurando” (Organization, 2008).

En 1995, se publicó la primera edición de la guía para evaluar y expresar la incertidumbre de medición, la cual establece la referencia necesaria en la que se afirma aquel parámetro que caracteriza la dispersión asignable razonablemente a la propiedad que se evalúa, y a través de esta se han preparado guías complementarias para su amplia aplicación. Estas guías complementarias corresponden a la serie de documentos que establece estatutos para la medición de la incertidumbre, que se pueden seguir en varios niveles de precisión y en muchos campos. (*JCGM - Comité Conjunto de Guías en Metrología*, s. f.)

En la Universidad Tecnológica de Pereira – Colombia, se llevaron a cabo algunos estudios a cerca de la estimación de la incertidumbre:



1. Una metodología didáctica y organizada, para la enseñanza de la estimación de la incertidumbre en mediciones experimentales para medir la conductividad eléctrica en aguas. ((Uribe & López, s. f.)
2. Un estudio a cerca de la estimación de la incertidumbre de dureza total en agua, según la guía GTC 51. ((García et al., 2012)
3. Cálculos sobre la estimación de incertidumbre en la medición de algunos parámetros de calidad de agua, aplicando tres diferentes técnicas de determinación de acuerdo a la GTC-51. (Benitez & Urueña, 2018)

(Solís-Castro et al., 2018) En Costa Rica, se realizó un estudio con el objetivo de determinar las relaciones existentes entre la conductividad, dureza cálcica y dureza total en pozos. Donde se seleccionaron 1948 pozos, obteniendo resultados de coeficientes de relación muy acertados, lo cual indica que la conductividad en situaciones normales. (Solís-Castro et al., 2018).

En Nicaragua, existen trabajos relacionados con la estimación de la incertidumbre asociada a las mediciones de parámetros de calidad de aguas para consumo humano, pero con respecto a la conductividad eléctrica específicamente no hay reportes.

Se realizó un estudio sobre validación y evaluación de incertidumbre en la determinación de hierro en aguas naturales, determinándose por condiciones óptimas espectrofotométrica, utilizando ortofenantrolina como complejante. (Cisne Altamirano, 2001)

También, a cerca de la medición de pH en aguas, logrando así evaluar la incertidumbre siguiendo el procedimiento general establecido en la guía GUM ISO 1995. (Delgado et al., 2008)

Y un estudio de carácter descriptivo de diferentes variables en muestras de aguas naturales, con la ejecución de diferentes modelos estadísticos y matemáticos para calcular hierro total por el método colorimétrico. (Herrera, 2020)

De acuerdo con el Vocabulario Internacional de términos generales y básicos en metrología, medición es "Un conjunto de operaciones que tienen como objetivo determinar el valor de una magnitud", esto implica la adquisición del dato, su tratamiento y la expresión del resultado.



Por múltiples factores, tanto aleatorios como sistemáticos, el resultado de una medición nunca será un número exacto. Aunque todas las posibles fuentes de error sean identificadas y las respectivas correcciones sean aplicadas siempre existirá la duda sobre qué tanto se acerca el resultado de la medición al valor verdadero de la misma, y es allí donde surge el concepto de incertidumbre como característica de la calidad de una medición. Por ende, la incertidumbre se considera un factor de calidad de la medición que proporciona una base para la comparación de los resultados. (Hernández, 2012)

Con respecto a la conductividad eléctrica del agua, exterioriza la amplitud de la misma para propagar la corriente eléctrica. La cual depende de la actividad de los iones disueltos, de su concentración, su movilidad y valencia, así como de la temperatura.

Para medirla físicamente, se mensura la resistencia que ofrece el agua al paso de la corriente eléctrica y se realiza mediante un conductímetro cuya medida se expresa como micro Siemens por centímetro. (Muñoz M. P., 2016)

El proceso de estimar la incertidumbre de la medición de conductividad eléctrica tiene como medio utilizar la ley de propagación de la incertidumbre, con el fin de trascender las incertidumbres de tipo A y B de las variables, aplicando la expansión analítica de Taylor con una aproximación de primer orden o enfoque GUM. En cualquier caso, el resultado de la medida es tan importante como la calidad de ésta, y se cuantifica mediante la estimación de su incertidumbre, que repercute en la conformidad del mensurando. (Fuente, 2013)

En vista de todos los factores que influyen en el valor de la conductividad, se plantea la siguiente interrogante:

¿Cuál es la incertidumbre expandida al medir conductividad eléctrica utilizando la interfaz LabQuest?

En Nicaragua, se encuentran registros de trabajos publicados concernientes a la estimación de la incertidumbre asociada a la medición de parámetros fisicoquímicos, sin embargo, no existen investigaciones que conlleven a la estimación de incertidumbre asociada a la medida de la conductividad eléctrica en ninguna matriz, pese a que éste es uno de los parámetros



indicadores de calidad del agua, particularmente para consumo humano. (Espinoza Lloréns, 2009)

La medida de conductividad eléctrica se efectúa mediante un conductímetro con una célula de medida de conductividad, formada por un par de electrodos (polos) a los que se aplica un voltaje. Siendo este el más apto debido a que presenta mayor precisión al momento de la determinación de ésta, a como también es el que más se adapta a los recursos de acuerdo a las necesidades presentes.

Los resultados de las estimaciones de incertidumbre en las mediciones de conductividad eléctrica en aguas de consumo humano son muy importantes ya que indica cuánto puede alejarse un resultado del valor considerado verdadero y establecer el impacto de variabilidad que pueden tener los resultados a partir de los números o factores que influyen e inciden de manera positiva o negativa. (Benitez Sebastian Castaño, 2018)

Durante cualquier medición siempre aparecen una serie de errores procedentes de distintas fuentes: el mensurado, el instrumento de medida, las condiciones ambientales, el operador entre otros, los cuales se clasifican en sistemáticos y aleatorios. (Solís-Castro, 2018).

En el presente trabajo se emplea la guía ISO GUM 2008 para establecer una metodología de estimación de la incertidumbre en la medición de conductividad eléctrica en agua, aplicando el método conductimétrico, tomando en cuenta todos los parámetros experimentales que intervienen en el proceso.



2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

- ✚ Estimar la incertidumbre en la medición de la conductividad eléctrica en muestras de agua potable, siguiendo el procedimiento general establecido en la guía ISO GUM 2008.

2.2 Objetivos Específicos

- ✚ Identificar las fuentes de incertidumbre en la medición de conductividad eléctrica.
- ✚ Enunciar un modelo matemático para la medición de conductividad eléctrica en muestras de agua potable.
- ✚ Establecer los coeficientes de sensibilidad de acuerdo al modelo matemático empleado en el método conductimétrico.
- ✚ Calcular la incertidumbre expandida en las muestras de agua objeto de estudio.



3 MARCO TEORICO

3.1 El Agua

El agua es una sustancia cuyas moléculas están compuestas por un átomo de oxígeno y dos de hidrogeno. Se trata de un líquido inodoro, insípido e incoloro, aunque también puede hallarse en estado sólido (cuando se conoce como hielo) o en estado gaseoso (Valdivielso, 2020).

3.1.1 Tipos de agua

Agua potable: Agua dulce que tras ser sometida a un proceso de potabilización se convierte en agua potable, apta para el consumo humano y que cumple con los parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

Agua dulce: El agua dulce es aquella que se encuentra naturalmente en la superficie de la Tierra en capas de hielo, humedales, lagunas, lagos, ríos y arroyos, y bajo la superficie como agua subterránea en acuíferos y corrientes bajo tierra. Se caracteriza generalmente por tener una baja concentración de sales y sólidos disueltos.

Agua salada: También se denomina agua de mar, siendo la que se encuentra en los océanos y los mares de la Tierra. Se caracteriza por tener una concentración de sales minerales disueltas en torno al 35%.

Agua salobre: El agua salobre es agua con una salinidad entre el agua dulce y el agua de mar. La salinidad del agua salobre no es condición definida con precisión y se considera que puede abarcar una gran variedad de regímenes de salinidad. El agua salobre puede contener entre 0,5 y 30 gramos de sal por litro.

Agua dura: El agua dura es aquella que contiene un alto nivel de minerales disueltos, en particular, sales de magnesio y calcio. En química, también se denomina agua calcárea.

Agua blanda: El agua blanda es el agua en la que se encuentran disueltas mínimas cantidades de sales. Se consideran aquellas que tienen menos de 50 mg/l de carbonato cálcico.

Agua destilada: El agua destilada es aquella sustancia cuya composición se basa en la unidad de moléculas de H₂O y ha sido purificada o limpiada mediante destilación.

Aguas residuales: Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad está afectada negativamente por la influencia antropogénica. Según la FAO, se trata de agua que



no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella.

Aguas negras: Dentro de las aguas usadas, las aguas negras son aquellas que están contaminadas con heces u orina.

Aguas grises: Las aguas grises son las aguas resultantes del uso doméstico. Tienen mucho menos nitrógeno y fósforo que las aguas negras y están compuestas por materia orgánica e inorgánica y microorganismos. Deben su nombre a su aspecto turbio y su condición de estar entre el agua dulce y potable y aguas residuales.

Agua bruta: El agua bruta o agua cruda es el agua que no ha recibido ningún tratamiento. Se encuentra en fuentes y reservas naturales de aguas superficiales y subterráneas (iAgua, 2019).

Aguas epicontinentales: En estas aguas aparte de los pantanos, que tradicionalmente se agrupan como humedales continentales, se incluyen lagos, ríos, estanques, corrientes, aguas subterráneas, manantiales, cavernas sumergidas, planicies de inundación, charcos e incluso el agua acumulada en las cavidades de los árboles (AGUAS CONTINENTALES, s. f.).

Aguas marinas: se contempla, el agua de mar, aguas estuarinas y las lagunas costeras; en estas matrices se tiene un incremento de salinidad por la influencia del agua de mar.

Para cada tipo de agua se deben considerar condiciones de muestreo y análisis de campo diferentes, por lo que cambian los requerimientos, equipos, materiales de campo, disoluciones de calibración y la especificación de los métodos de manejo y análisis de muestras; estas condiciones se especifican durante la elaboración del plan de muestreo y se deberán tomar en cuenta para la preparación de los equipos y materiales de campo.

3.2 Calibración del material volumétrico

Los análisis clásicos que son cuantitativos se obtienen a partir de dos mediciones básicas: la masa y el volumen. las valoraciones volumétricas o titulaciones determinan la concentración de sustancias químicas con precisión y exactitud. los volúmenes se determinan por los materiales volumétricos (pipeta, bureta, matraz aforado, y probeta) que tienen como finalidad tomar una medida exacta. Estos se obtienen de varias calidades muchas veces por ser mal manipulados se dañan. Por tal razón es importante conocer la condición, el manejo y la calibración.



La calibración del material volumétrico es un procedimiento de control de calidad. Además, se debe controlar la temperatura que influye en el calibrado de dos formas.

En primer lugar, porque el volumen ocupado por la masa de un líquido varía con esta y en Segundo lugar, porque el volumen del material volumétrico es variable, debido a la tendencia del vidrio a dilatarse o contraerse en función de la temperatura. (Ramírez, 2015)

El Método Gravimétrico es el método de medición aplicable a la calibración de materiales volumétricos. Con este método se mide el volumen del material volumétrico, a través de la masa del agua destilada contenida en el recipiente, y que se obtienen de la diferencia de la masa del recipiente con agua y la masa del recipiente vacío. La calibración puede ser en la modalidad para entregar o para contener, en el primer caso se requiere un recipiente que es el que se pesa vacío y lleno y se requiere considerar los tiempos de entrega; la modalidad para contener es en el mismo recipiente que se pesa lleno y vacío, cuando está vacío debe estar completamente seco. Además como parte de las mediciones se registran la temperatura ambiental, la temperatura del agua, la presión atmosférica y la humedad relativa. La densidad del agua destilada se conoce en función de la temperatura del agua.

El procedimiento de medición aplicable al método gravimétrico se resume a continuación:

1. Limpiar y secar el recipiente volumétrico que se pretende calibrar.
2. Acondicionar el sistema de medición a la temperatura de prueba del recipiente y de los equipos, a la temperatura del laboratorio donde se realiza la calibración, para tener un sistema de medición en equilibrio.
3. Llenar con agua destilada y ajuste del menisco.
4. Determinar la masa de agua, midiendo la masa del recipiente vacío y lleno, por el método de medición directa (colocar el objeto en el platillo y leer directamente en el instrumento).
5. Registrar la temperatura del agua.
6. Registrar las condiciones ambientales: la temperatura ambiental, la temperatura del agua, la presión atmosférica y la humedad relativa.
7. Calcular el volumen.
8. Informar resultados de la medición y la estimación de incertidumbre. (UNAM, 2009)



3.3 Método conductimétrico

El método conductimétrico es un método basado en la medición de la conductancia de las muestras, y ampliamente utilizado para medir la conductividad eléctrica de las mismas. En las muestras, la conductancia se relaciona proporcionalmente con la concentración de iones, los cuales permiten la conducción directa de la corriente eléctrica. (Muñoz C. , 1981)

3.4 Conductividad eléctrica

La conductividad mide la capacidad de una solución para conducir corriente eléctrica y por tanto es inversa a la resistencia. Esta capacidad está determinada por la presencia de iones o sales minerales disociadas en la sustancia, la presencia de estos iones, disminuye la resistencia que ofrece la sustancia para conducir corriente eléctrica, los iones en la solución son considerados como electrolitos, los electrolitos se clasifican en cationes y aniones.

El agua pura, prácticamente no conduce la corriente eléctrica, sin embargo, el agua con sales disueltas, sí la conduce ya que los iones cargados positiva y negativamente son los responsables de conducir la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad.

En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad, este efecto continúa hasta que la solución está tan llena de iones que se restringe la libertad de movimiento y la conductividad puede disminuir en lugar de aumentar.

La temperatura es un factor que influye en la conductividad, así tenemos que un aumento en la temperatura, disminuye la viscosidad del agua y permite que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más electricidad. Este efecto de la temperatura es diferente para cada ion, pero típicamente para soluciones acuosas diluidas, la conductividad varía de 1 a 4 % por cada grado centígrado. Conociendo estos factores, la medición de la conductividad nos permite tener una idea muy aproximada de la cantidad de sales disueltas.

Los conductímetros son los aparatos utilizados para medir la conductividad eléctrica. Básicamente los conductímetros son instrumentos compuestos por dos placas de un material especial (platino, titanio, níquel recubierto con oro, grafito, etc.), una fuente alimentadora y un sector o escala de medición. Cuando es aplicada una diferencia de potencial entre las placas



del conductímetro, este mide la cantidad de corriente que como consecuencia pasa por ellas. En este caso mediante un conductímetro se determina la capacidad de las aguas de transportar una corriente eléctrica y encontrar el contenido total de constituyentes iónicos.

Con los valores del voltaje aplicado y con la intensidad eléctrica de la corriente que pasa por las placas, los conductímetros determinan, de acuerdo a su previa calibración, la conductividad de la muestra ensayada.

Hay muchos tipos de conductímetros y los valores de la conductividad son dependientes de la geometría de la celda de cada aparato. Es por ello que cada uno mide una conductividad específica la cual es el producto de la conductividad realmente medida multiplicada por la constante de la celda del mismo.

Las unidades de la conductividad eléctrica son el Siemens/cm (las unidades antiguas, eran los ohms/cm que son numéricamente equivalentes al S/cm). En la práctica no se mide la conductividad entre electrodos de 1 cm³, sino con electrodos de diferente tamaño, rectangulares o cilíndricos, por lo que, al hacer la medición, en lugar de la conductividad, se mide la conductancia, la cual al ser multiplicada por una constante (k) de cada celda en particular, se transforma en la conductividad en S/cm (Merino, s. f.).

3.4.1 Conductancia

Se le denomina conductancia a la facilidad de que tiene un material al paso de la corriente eléctrica. Esta propiedad se es más notoria en los metales. Se puede deducir que la conductancia es el recíproco a la resistencia en un circuito. La conductancia es la medida de la facilidad con la que la corriente eléctrica (es decir, el flujo de carga) puede atravesar un material. La conductancia es la inversa (o recíproca) de la resistencia eléctrica, representada como $1/R$.

La conductancia es una expresión de la facilidad con la que la corriente eléctrica fluye a través de materiales como los metales y los no metales. En las ecuaciones, la letra G mayúscula simboliza la conductancia. La unidad estándar de conductancia es el siemens (S), antes conocido como mho.

La conductancia es esencialmente una propiedad que se encuentra en los buenos conductores de la electricidad, como el aluminio y el cobre. Los átomos y las moléculas de



estos metales se encuentran en un estado de movimiento aleatorio, lo que hace que los electrones de las capas exteriores se salgan de su órbita y se conviertan en electrones libres. Estos electrones libres pueden moverse de un átomo a otro. Siempre que hay una diferencia de potencial, se desplazan de un potencial bajo a un potencial alto (J.L, 2022).

3.4.2 Conductancia específica

La conductancia específica es la medida de la capacidad del agua para conducir electricidad. Esta conductividad se basa en la cantidad de compuestos sólidos que se disuelven en la muestra de agua. Cuanto mayores son los sólidos disueltos, mayor es la conductividad. La conductancia específica se puede utilizar para medir la calidad del agua y probar indirectamente el nivel de contaminación presente en el agua.

La conductancia ocurre porque hay más iones móviles y presentes en una solución que en una sustancia pura. El agua pura contiene moléculas de H_2O , que son neutras. El agua salada, sin embargo, contiene moléculas de H_2O e iones, átomos cargados positiva o negativamente, de cloro (Cl^-) y sodio (Na^+) de la sal disuelta. Como tienen carga, pueden conducir electricidad. Cuantos más iones estén presentes, mayor será la conductividad.

Esta conductancia se mide utilizando un sensor que mide realmente qué tan bien una sustancia no conduce electricidad o resiste la corriente eléctrica. La unidad utilizada para medir la conductancia específica está en siemens, que indica una medida de conductancia eléctrica. Las medidas se dan generalmente en micro Siemens por centímetro

Como en el caso del agua de mar, la conductancia específica puede ser alta por razones naturales. Ciertas rocas pueden liberar iones cuando el agua fluye sobre ellas, lo que aumenta la conductancia específica del agua con la que entran en contacto. Además, el agua de lluvia a menudo tiene una conductancia más alta que el agua pura porque recoge polvo y partículas de gas cuando cae del cielo (Barrera, 2020)

3.4.3 Conductimetría

Es un método analítico basado en la conducción eléctrica de los iones en solución, que se utiliza para medir la molaridad de una disolución, determinada por su carga iónica o salina de gran movilidad entre dos puntos de diferente potencial. La conductividad eléctrica es un



fenómeno de transporte en el cual la carga eléctrica (en forma de electrones o iones) se mueve a través de un sistema.

La conductimetría es una técnica instrumental que tiene como objeto determinar la conductividad de las disoluciones de las sustancias llamadas electrolitos, las cuales se caracterizan por ser conductoras de la electricidad y por presentarse en las mismas el fenómeno de ionización.

Este análisis se realiza en el interior de las celdas conductimétricas, que son celdas electrolíticas modificadas, de manera que tendrán las mismas características. En las celdas los cationes irán al ánodo y los aniones irán al cátodo. Con este desplazamiento los iones transportarán la corriente moviéndose a una velocidad concreta nombrada velocidad de migración. La velocidad de migración (V) depende de varios factores como el campo eléctrico que se aplique a la celda y las características del ion (la movilidad eléctrica del ion (u), el tamaño, la carga y su grado de hidratación) (*Conductimetria de Eliecer Casique - Issuu*, 2015).

3.5 Error

Es definido como la diferencia entre un resultado individual y el valor verdadero del mensurando, de esta forma, el error es un valor único. En principio, la parte sistemática de un error puede corregirse si todas las fuentes de error son conocidas, aunque la parte aleatoria de un error es (por definición) variable de una determinación a otra.

La incertidumbre del resultado de una medición, nunca deberá interpretarse como representante del error, ni del error que queda después de la corrección. Para ilustrar más la diferencia, el resultado de un análisis después de corregirse, por casualidad puede estar muy cercano al valor del mensurando y por lo tanto tener un error despreciable. Sin embargo, la incertidumbre, aún puede ser muy grande, simplemente porque el analista está inseguro de que tan cercano está el resultado con respecto al valor real.

3.5.1 Errores en mediciones analíticas

En la mayoría de las mediciones podemos distinguir entre dos tipos de errores: aleatorios y sistemáticos.



- **Errores aleatorios:** Se hallan presentes en todas las mediciones y hacen que los resultados duplicados recaigan a ambos lados del valor medio. El error aleatorio de una medición no puede compensarse, pero, si se incrementa el número de observaciones y se capacita al analista, se pueden reducir los efectos.

- **Errores sistemáticos:** Ocurren en la mayoría de los experimentos, pero sus efectos son bastante diferentes. La suma de todos los errores sistemáticos en un experimento se conoce como sesgo (*Propuesta de validación del proceso de muestreo de agua potable*, s. f.).

3.6 Desviación Estándar

La desviación estándar o desviación típica es la es una medida de centralización o dispersión para variables de razón (ratio o cociente), y de intervalo de gran utilidad para la estadística descriptiva. Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Junto con este valor, la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética. La desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. [8] La agrupación de datos repetidos analizados desde la desviación estándar nos indicará la precisión de la incertidumbre.

Varianza: La varianza son valores estadísticos que se estiman a partir de una o varias muestras obtenidas de una misma población, esta se estima como una medida de dispersión.

3.7 Coeficiente de Varianza

El coeficiente de variación es una medida de dispersión útil para comparar dispersiones a escalas distintas pues es una medida invariante ante cambios de escala. Sirve para comparar variables que están a distintas escalas pero que están correlacionadas estadísticamente y sustantivamente con un factor en común.

3.8 Repetibilidad

La repetitividad es la concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando efectuadas en las mismas condiciones de medida denominadas condiciones de repetibilidad.



3.8.1 Condiciones de repetibilidad

son aquellas que se producen cuando en las distintas mediciones se utilizan el mismo procedimiento de medida, el mismo observador, el mismo instrumento de medida utilizado en las mismas condiciones, el mismo lugar y unas repeticiones de las mediciones a lo largo de un corto periodo de tiempo, es decir las condiciones de repetibilidad vienen a ser aquellas que se producen dentro de una serie de mediciones. Se considera una serie metrológica al conjunto de mediciones realizadas con un mismo sistema de medida entre dos momentos previamente delimitados. La repetibilidad se expresa cuantitativamente mediante la desviación típica metrológica o el coeficiente de variación metrológico que en este caso se denominan desviación típica de repetibilidad y coeficiente de variación de repetibilidad.

3.9 Intervalo de medida

Es el intervalo de valores de una magnitud en la que el procedimiento de medida se aplica sin modificaciones.

3.10 Guía ISO GUM 2008

Esta Guía establece las reglas generales para la evaluación y expresión de la incertidumbre de medida, destinada a ser aplicable a un amplio espectro de mediciones. La base de la Guía es la Recomendación 1(CI-1981), del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) y la Recomendación INC-1 (1980) del Grupo de Trabajo sobre la Expresión de las Incertidumbres. La "Guía para la Expresión de la Incertidumbre en la Medición", abreviada como GUM, se considera la norma mundialmente aceptada para la evaluación y especificación de las incertidumbres de medición y ha sido adoptada por varias organizaciones internacionales. La GUM sigue el enfoque de declarar cada resultado de medición como la mejor estimación de un mensurando con la incertidumbre de medición asociada. Así, el método GUM proporciona un procedimiento de evaluación claramente definido para realizar la descripción de la tarea de medición y los rangos de variabilidad de las magnitudes relevantes, utilizando distribuciones de probabilidad y ecuaciones de modelos. Efectivamente, con la ayuda del método GUM se puede mostrar de forma transparente qué correlaciones se utilizan para la determinación de la incertidumbre de medición y cómo se considera la estimación de las magnitudes implicadas.



Las reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre de medida, pueden seguirse para los diversos niveles de exactitud requeridos y en diversos campos, desde el taller hasta la investigación. Por lo tanto, se pretende que los principios de esta Guía sean aplicables a un gran campo de mediciones, incluyendo aquellas necesarias para:

- mantener el control y el aseguramiento de la calidad en la producción;
- cumplir y hacer cumplir con leyes y reglamentos;
- conducir la investigación básica, y la investigación y el desarrollo aplicados en la ciencia y en la ingeniería;
- calibrar patrones e instrumentos y realizar ensayos dentro de un sistema nacional de medidas, con el fin de conseguir trazabilidad a patrones nacionales;
- desarrollar, mantener y comparar patrones de referencia físicos nacionales e internacionales, incluyendo materiales de referencia.

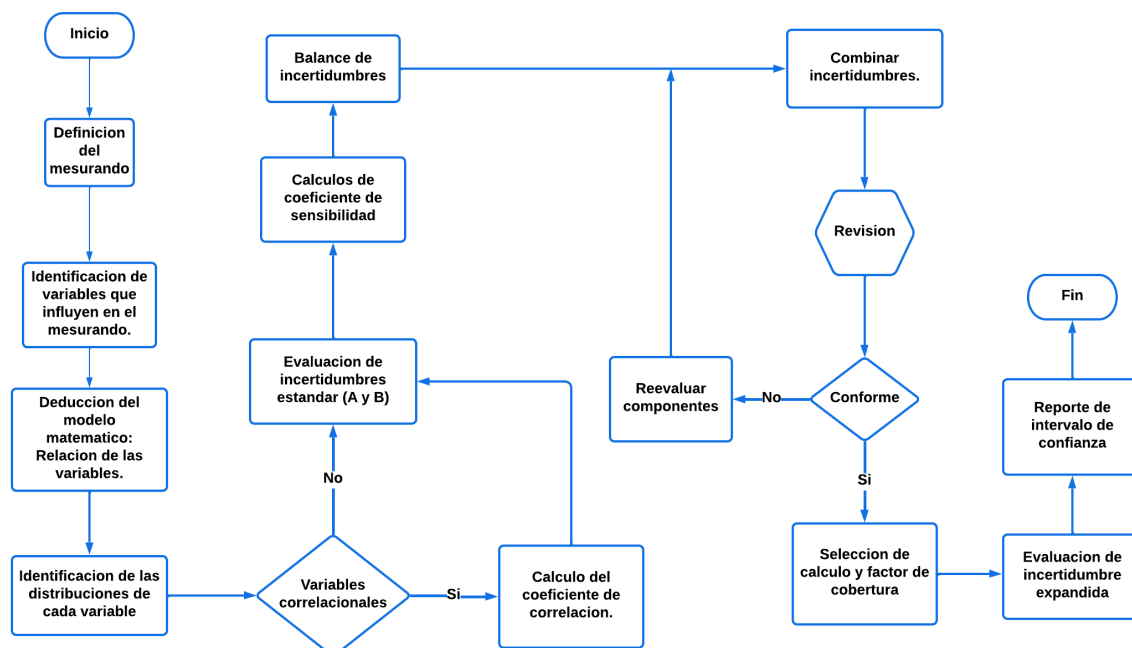
Esta Guía es también aplicable a la estimación y expresión de la incertidumbre asociada al diseño conceptual y análisis teórico de experimentos, métodos de medida, y componentes y sistemas complejos. Dado que el resultado de medida y su incertidumbre pueden poseer naturaleza conceptual, estando basados por entero en datos hipotéticos, el término “resultado de medida” tal como se utiliza en esta Guía debe interpretarse en este sentido amplio.

También proporciona reglas generales para evaluar y expresar la incertidumbre de medida, más que instrucciones detalladas y específicas, referidas a una técnica concreta. Además, no se ocupa de cómo utilizar la incertidumbre de un resultado de medida particular, una vez evaluada, para otros fines, por ejemplo, para obtener conclusiones acerca de la compatibilidad de dicho resultado con otros resultados similares, para establecer límites de tolerancia en un proceso de fabricación, o para decidir si determinada acción puede ejecutarse con seguridad. En consecuencia, puede ser necesario desarrollar normas particulares basadas en esta Guía, para ocuparse de problemas particulares en campos de medida específicos, o de las diversas utilidades

de las expresiones cuantitativas de la incertidumbre. Estas normas pueden ser versiones simplificadas de la presente Guía, pero deben incluir el grado de detalle apropiado al nivel de exactitud y complejidad de las mediciones y usos a que se destinan (*JCGM*, 2008).

Figura 1. Diagrama de flujo procedimiento para estimar incertidumbre en mediciones según la guía ISO GUM 2008.

Figura 1
Procedimiento para estimar incertidumbre



3.10.1 Mensurando

El mesurando es una magnitud particular sometida a una medición en una comparación con un patrón que proporciona la información requerida. De acuerdo al Vocabulario Internacional de Metrología (VIM), es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. La definición del mensurando es vital para obtener buenos resultados de la medición.

3.10.2 Definición del mesurando

Para nuestro trabajo, el mesurando es Conductividad Eléctrica (CE). Se medirá en un equipo Labquest1 con sonda de conductividad eléctrica, ambos de Vernier. Cuyos resultados se contrastarán con valores de estándares de referencia.



3.10.3 Magnitud influyente

Es una magnitud diferente del mesurando que afecta al resultado de medida. Es decir que son magnitudes que no constituyen el objeto directo de la medida pero que están presentes durante la medición y la perturban tales como: el pH y la temperatura. (Arderiu & Manrique, 2002a).

Las variables de las cuales depende el mesurando son: temperatura, concentración de sales disueltas, cantidad de iones.

3.10.4 Modelo Matemático

El modelo matemático es a través del cual se relaciona la conductividad eléctrica con la concentración de los iones. Para ello se considera los iones (i) con sus correspondientes concentraciones (C_i), y sus respectivas conductividades molares (λ_i). De este modo, la conductividad total de cualquier solución es la suma de las conductividades de todos los iones presentes.

$$CE_{Tx} = \sum_i \lambda_i C_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Así, CE_T es la conductividad medida a temperatura ambiente.

Sin embargo, la calibración interna del conductímetro se verifica con estándares de referencia por lo general a 25 °C. Por tal razón, las medidas deberán corregirse empleando la siguiente ecuación:

$$CE_{corr} = \frac{CE_{Tx}}{1+0.02(T-T_{ref})} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

CE_{corr} = Conductividad eléctrica corregida.

CE_{Tx} = Conductividad eléctrica a temperatura ambiente.

T = Temperatura del ambiente.

T_{ref} = Temperatura de referencia (25 °C).

α = Coeficiente de temperatura, $\alpha = 0.02$.

Distribución de Probabilidad

La cuantificación de una fuente de incertidumbre influye en la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor.



3.10.5 Las distribuciones más frecuentes son:

Distribución Normal: Si la estimación de x_i (tolerancia) se toma de la especificación del fabricante, de un certificado de calibración, manual u otra fuente y su incertidumbre asignada se establece como un múltiplo particular de una desviación estándar, la incertidumbre estándar $u(x_i)$ es simplemente el valor asignado dividido por el multiplicador y la varianza estimada $u^2(x_i)$ es el cuadrado de dicho cociente.

Distribución Rectangular: En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, ósea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. ejemplos típicos son la resolución de un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento.

Distribución triangular: Esta distribución debe usarse cuando el analista tenga un conocimiento previo que justifique su utilización, por ejemplo, en el uso de los materiales volumétricos clase A la experiencia dice que el volumen vertido o contenido por él mismo está más cerca del valor nominal que fuera de él (Arderiu & Manrique, 2002).

3.11 Incertidumbre

La incertidumbre de medición, es “el parámetro asociado al resultado de una medición que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando”. En términos más sencillos representa la “duda” de la validez del resultado de la medición. La incertidumbre es un parámetro que refleja la calidad del metrológico completo, incluyendo los métodos, equipos, patrones, analistas y condiciones ambientales. La “Guía ISO GUM 2008 para la evaluación y expresión de la incertidumbre de medición”, establece un procedimiento completo para estimar la incertidumbre en métodos de ensayo y calibración; sin embargo, se plantea una estrategia muy general y cada laboratorio debe adaptarla a sus propias condiciones y objetos de ensayo.

La incertidumbre proporciona una idea de la calidad del resultado, ya que indica cuánto puede alejarse un resultado del valor considerado verdadero. Por tanto, los resultados siempre deben ir acompañados de su incertidumbre, para que se puedan tomar decisiones basadas sobre dichos resultados.

La expresión general es denominada ley de propagación de la incertidumbre:

$$U_{[Y_{(X_i, X_j, \dots, X_n)}]} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\delta y}{\delta x_i} u(x_i) \right]^2 + \sum_{i,k=1}^{n-i \neq k} \left[\frac{\delta y}{\delta x_i} \frac{\delta y}{\delta x_k} s(x_i, x_k) \right]} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde el resultado $Y_{(X_i, X_j, \dots)}$ es una función de n parámetros $X_i, X_j, \dots, u_{(Y, \dots)}$ su incertidumbre estándar, $u(X_i)$ la incertidumbre asociada con X_i $\delta y / \delta x_i$ es la diferencial parcial con respecto a X_i , y $S(x_i, x_k)$ es la covarianza entre X_i y X_k .

El término de la covarianza no se aplica cuando los efectos son independientes, es decir, $S(x_i, x_k) = 0$. Es por consiguiente esencial y eficaz estudiar todos los efectos relevantes individuales sobre los resultados.

3.11.1 Incertidumbre analítica derivada del proceso analítico.

Para estimar las incertidumbres derivadas de todas las partes del proceso de medición, se considera esencial que los procedimientos eficaces estén disponibles. Estos deben incluir las incertidumbres derivadas de cualquier muestreo y preparación física, así como la variabilidad derivada de la heterogeneidad del material (Arderiu & Manrique, 2002b).

3.11.2 Incertidumbre de medida

Parámetro, asociado al resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores que razonablemente pueden atribuirse al mesurando.

3.11.3 Identificación de las fuentes de incertidumbre

En general, la incertidumbre de las mediciones está formada por numerosos componentes, que tienen su origen en las actividades relacionadas con la muestra. La incertidumbre de un resultado analítico se ve influenciada por tres fases principales de determinación:

- Operaciones externas: muestreo, envasado, transporte, contaminación cruzada y almacenamiento de muestras.
- Preparación de la porción de ensayo: subdivisión, preparación y procesamiento de la muestra.
- Análisis: extracción, limpieza, evaporación, derivatización, determinación instrumental.

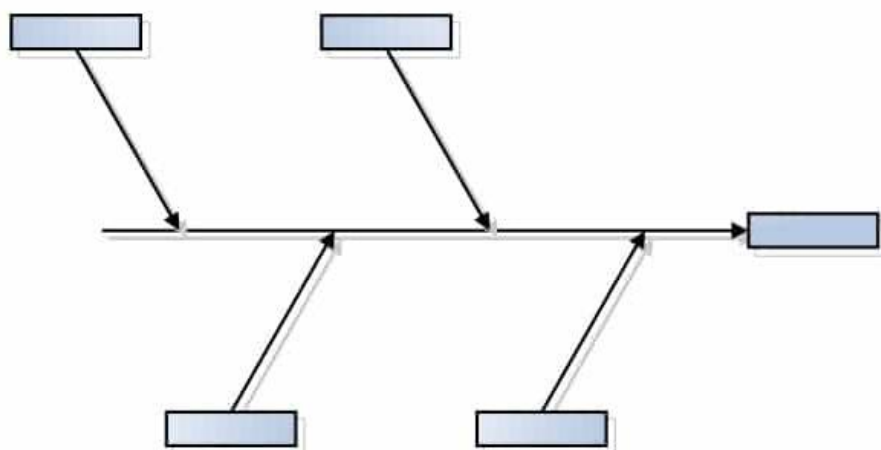
3.11.4 Diagramas de causa y efecto o diagrama Ishikawa

Un diagrama de Causa y Efecto es la representación de varios elementos (causas) de un sistema que pueden contribuir a un problema (efecto). Fue desarrollado en 1943 por el Profesor Kaoru Ishikawa en Tokio. Algunas veces es denominado Diagrama Ishikawa o Diagrama Espina de Pescado por su parecido con el esqueleto de un pescado. Es una herramienta efectiva para estudiar procesos y situaciones, y para desarrollar un plan de recolección de datos.

Es utilizado para identificar las posibles fuentes de incertidumbres en diversos análisis químicos. La naturaleza gráfica del Diagrama permite que los grupos organicen grandes cantidades de información sobre el problema y determinar exactamente las posibles causas. Finalmente, aumenta la probabilidad de identificar las causas principales de incertidumbre.

Figura 2

Ejemplo de diagrama de Ishikawa



En la estimación de la incertidumbre total, puede ser necesario tomar cada fuente y tratarla en forma separada para obtener su contribución. Es posible referirse a cada una de las contribuciones individuales, como un componente de la Incertidumbre. Cuando este componente se expresa como una desviación estándar, se conoce como incertidumbre estándar y se indica como $u(y)$. Si existe correlación entre cualquiera de los componentes, es necesario tomarlo en consideración mediante la determinación de la covarianza. Sin embargo, frecuentemente, es posible evaluar el efecto combinado de varios componentes. Esto puede reducir el esfuerzo total involucrado y en el caso donde la contribución de los componentes



sea evaluada en conjunto y que se encuentren correlacionados, no habrá necesidad adicional de tomar en cuenta la correlación.

Para el resultado de una medición y la incertidumbre total, denominada incertidumbre estándar combinada y simbolizada como $U_c(y)$, es una desviación estándar estimada, igual a la raíz cuadrada positiva de la varianza total obtenida por la combinación de todos los componentes de varianza y covarianza, evaluados mediante la aplicación de la ley de propagación de la incertidumbre (Delgado, Vanegas, & Delgado, Metrología química II: Estimación de la incertidumbre en la medición de pH en aguas, 2008)

3.11.5 Incertidumbre estándar.

Incetidumbre del resultado de una medida expresado como una desviación estándar.

Incetidumbre estándar de tipo A: La estimación de tipo A se basa en la estimación de la desviación típica de los resultados obtenidos al medir repetidamente el mesurando. Siempre que sea posible se tiene que aplicar este tipo de estimación. La incetidumbre así estimada se denomina incetidumbre típica de tipo A.

Incetidumbre estándar de tipo B: La estimación de tipo B se basa en la información dada por los fabricantes de los instrumentos de medida o en datos bibliográficos y en ciertas Asunciones estadísticas, como el tipo de distribución de frecuencias más apropiado en cada caso. La incetidumbre así estimada se denomina incetidumbre típica de tipo B. La estimación de tipo B se aplica cuando no se pueden hacer medidas repetidas del mesurando que permitan estimar la desviación típica experimental, como la medida de un volumen de líquido con una pipeta graduada o con una probeta o la medida de una masa con una balanza. En estos casos para poder calcular la desviación típica correspondiente a la estimación de la incetidumbre típica de tipo B se tiene que decidir cuál es la distribución de frecuencias que siguen los resultados si se pudiesen hacer medidas repetidas del mesurando. (Delgado, Vanegas, & Delgado, Metrología química II: Estimación de la incetidumbre en la medición de pH en aguas, 2008)



3.11.6 Incertidumbre estándar relativa (U_{er}):

Se denota por U_{er} y se obtiene dividiendo la media de la incertidumbre combinada con respecto a la media poblacional de los factores multiplicados por cien.

$$\%U_{ER} = \frac{U}{\bar{X}} * 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

3.11.7 Incertidumbre estándar combinada (U_c):

Es la incertidumbre estándar del resultado de una medición cuando éste es obtenido de una combinación de valores de otras cantidades y es igual a la raíz cuadrada positiva de una suma de términos, estos términos son las varianzas o covarianzas de las otras cantidades, ponderadas de acuerdo a la variación del resultado de la medición con el cambio de estas cantidades.

3.11.8 Factor de Cobertura

Es el factor numérico utilizado como un multiplicador de la incertidumbre estándar combinada para obtener la incertidumbre expandida.

El factor de cobertura (k) se escoge o establece en base al nivel de confianza con el que queremos expresar nuestros resultados. Por lo general, el valor del factor de cobertura correspondiente a un nivel de confianza del 99% es igual a $2.58 \cong 3$, y para un nivel de confianza del 95% $k = 1.96 \cong 2$.

3.11.9 Incertidumbre expandida (U_e):

Es la cantidad que define un intervalo para el resultado de una medición, en el cual puede esperarse que se encuentre una fracción grande de la distribución de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al objeto medible. Esta se denota por U_e y se obtiene multiplicando la incertidumbre combinada (U_c) por un factor de cobertura (K). (Delgado & Nagel, Un experimento sencillo para evaluar la incertidumbre siguiendo la guía ISO GUM 1995 y utilizando el cálculo simbólico MAPLE 11.0, 2008)

$$U_e = \kappa * U_c \quad \text{Ecuación 5}$$



3.11.10 Fuentes de incertidumbre en mediciones de masa

La incertidumbre de una balanza analítica tiene tres componentes: resolución, verificación de la calibración (linealidad y sensibilidad), y precisión (repetibilidad). La balanza analítica digital Sartorius AC210S, establece una resolución de **a = 0,1 mg**.

En metrología, las balanzas siguen una distribución rectangular por lo que la incertidumbre de su resolución es **$U_{(a)} = a/(2\sqrt{3})$** .

La repetibilidad se representa por la incertidumbre estándar de las pesadas y se expresa como desviación estándar (*s*) dividido por \sqrt{n} , donde *n* es el número de mediciones para la repetibilidad.

La verificación de la calibración tiene dos componentes: linealidad y sensibilidad.

La sensibilidad es despreciable debido a que la pesada por diferencia se realiza en la misma balanza. De modo que la incertidumbre de la verificación de la calibración se resume a la linealidad, y ésta se determina por la deriva (*L*). (Sartorius, 1994)

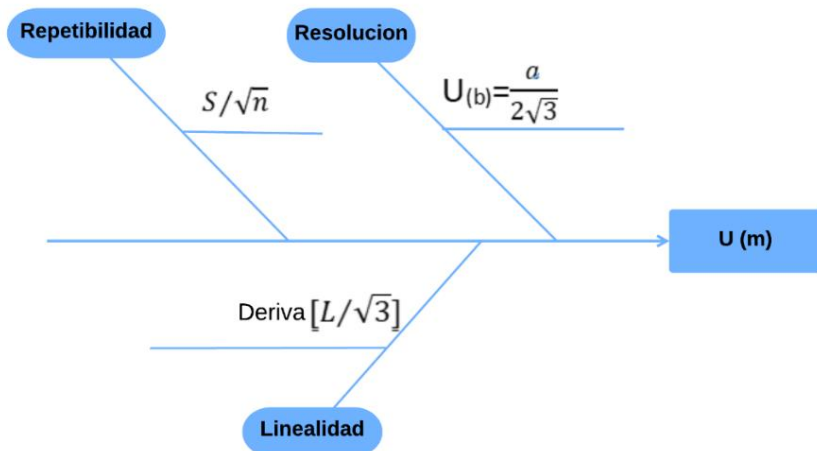
Así, la incertidumbre combinada de la balanza debido a la pesada U_b sería:

$$U_b = \sqrt{\left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + 2\left(\frac{L}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

El factor 2 indica la doble pesada (por diferencia o tara). Si la pesada fuese absoluta el factor 2 se elimina de dicha ecuación.

Figura 3

Diagrama fuentes de incertidumbre asociada a la masa.





3.11.11 Fuentes de incertidumbre en mediciones con volumétricos

Las incertidumbres en las mediciones de volumétricas con materiales tales como balones aforados, buretas, pipetas, y probetas; tienen tres fuentes de incertidumbre:

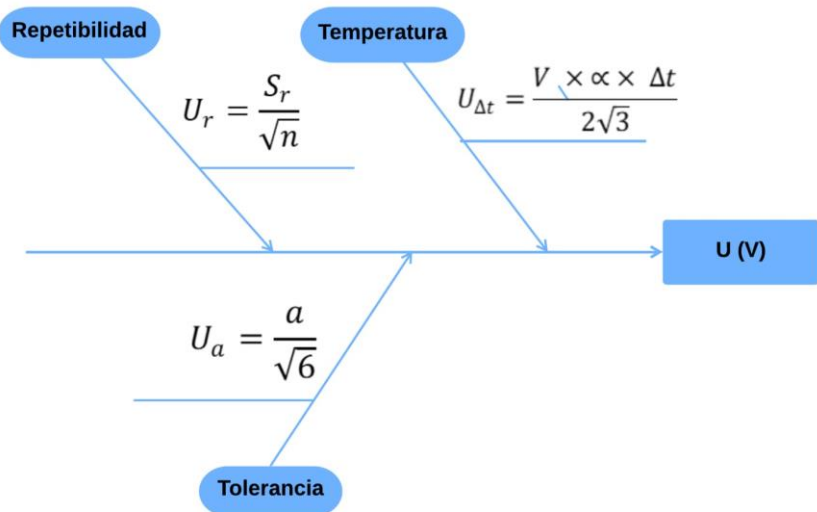
- Tolerancia $u(f) = (a/\sqrt{6})$ debido a la calibración del fabricante con una distribución triangular.
- Precisión $u(r) = s/\sqrt{n}$ expresada como error estándar o desviación estándar entre la raíz del número de réplicas.
- Y efecto de la temperatura del ambiente $u(\Delta t)$ con distribución rectangular, que a su vez tiene efecto sobre la expansión cubica de los líquidos y sobre del tipo de vidrio del volumétrico. Sin embargo, el coeficiente de expansión del vidrio es mucho más pequeño que la de los líquidos y se puede despreciar. (Cisne)

$$U_V = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{6}}\right)^2 + \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{V \alpha \Delta t}{2\sqrt{3}}\right)^2} \text{ Ecuación 7}$$

A continuación, la figura 4 presenta el diagrama Ishikawa para las fuentes de incertidumbre asociadas a las mediciones con volumétricos.

Figura 4

Diagrama fuentes de incertidumbre asociada al volumen.





3.11.12 Fuentes de incertidumbre en materiales de referencia

Los materiales de referencias (estándares, muestras certificadas y pesos atómicos) en general siguen una distribución rectangular, por lo que sus incertidumbres estándares se determinan de la siguiente manera:

$$U_x = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{Ecuación 8}$$

3.11.13 Fuentes de incertidumbres asociadas a la preparación del KCl 0.1M

Las fuentes de incertidumbre en el proceso de preparación de la disolución de KCl 0.1M, se estimó a partir del siguiente modelo matemático:

$$m_{KCl} = M_{KCl} \cdot V_{KCl} \cdot Pf_{KCl} \cdot P_{KCl} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

m_{KCl} : es la masa de KCl.

M_{KCl} : es la molaridad de la solución de KCl.

V_{KCl} : es el volumen del matraz volumétrico en el cual se prepara la solución.

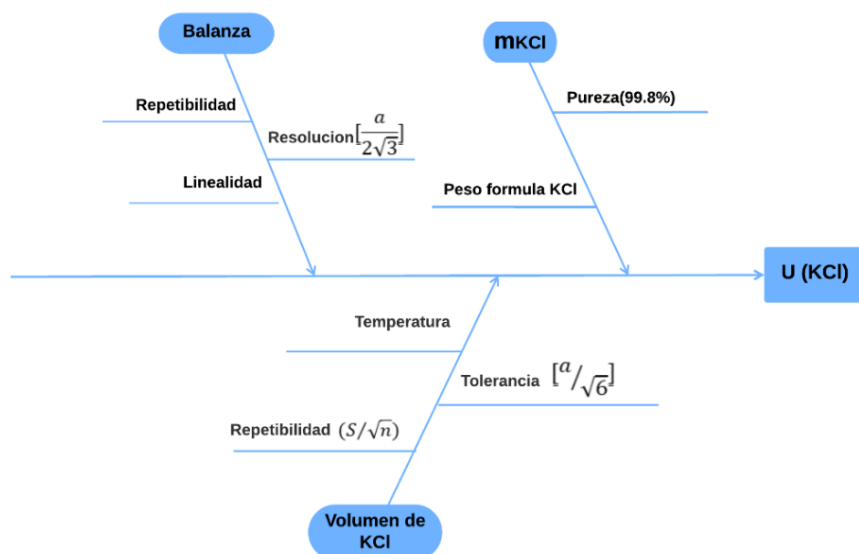
Pf_{KCl} : es el peso fórmula del KCl.

P_{KCl} = pureza del KCl.

En la figura 5 se aprecia las fuentes de incertidumbre en el proceso de preparación de la solución de KCl 0.1M.

Figura 5

Diagrama fuentes de incertidumbre asociada a la preparación de KCl



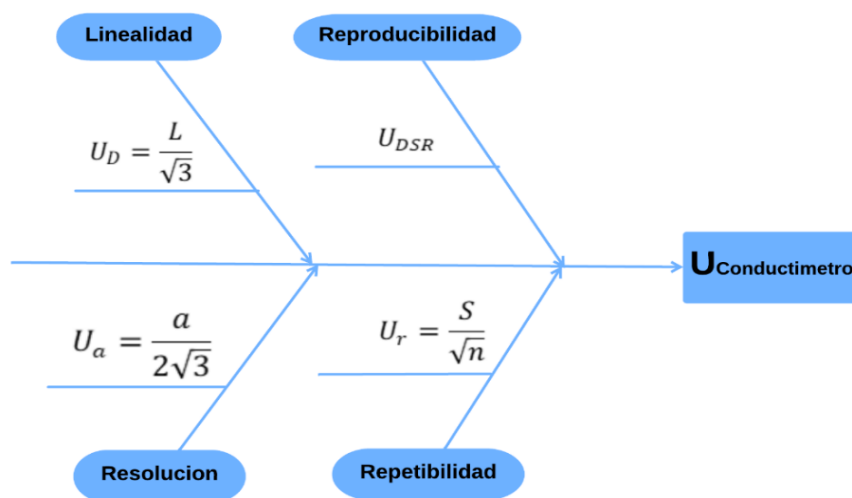
3.11.14 Fuente de incertidumbre del equipo conductimétrico

Las principales fuentes de incertidumbre asociadas al conductímetro LabQuest1 de Vernier son las aportadas por la resolución, linealidad, repetibilidad, y la reproducibilidad.

La figura 6 muestra las fuentes de incertidumbre de la interfaz LabQuest1.

Figura 6

Diagrama de causa y efecto de las fuentes de incertidumbre del conductímetro LabQuest1 de Vernier.



3.11.15 Fuente de incertidumbre en la medición de conductividad eléctrica

Las fuentes de incertidumbre en la medición de conductividad eléctrica pueden ser variadas, las más comunes son las siguientes:

1. **Instrumento de medición:** la calidad y la calibración del instrumento de medición son fundamentales. Si el medidor no está calibrado correctamente los resultados pueden ser imprecisos. Además, la resolución del instrumento puede influir en la precisión de las mediciones.
2. **Temperatura:** la conductividad eléctrica de una solución varía con la temperatura. Si la temperatura no se controla o se corrige adecuadamente, puede haber variaciones significativas en las lecturas.

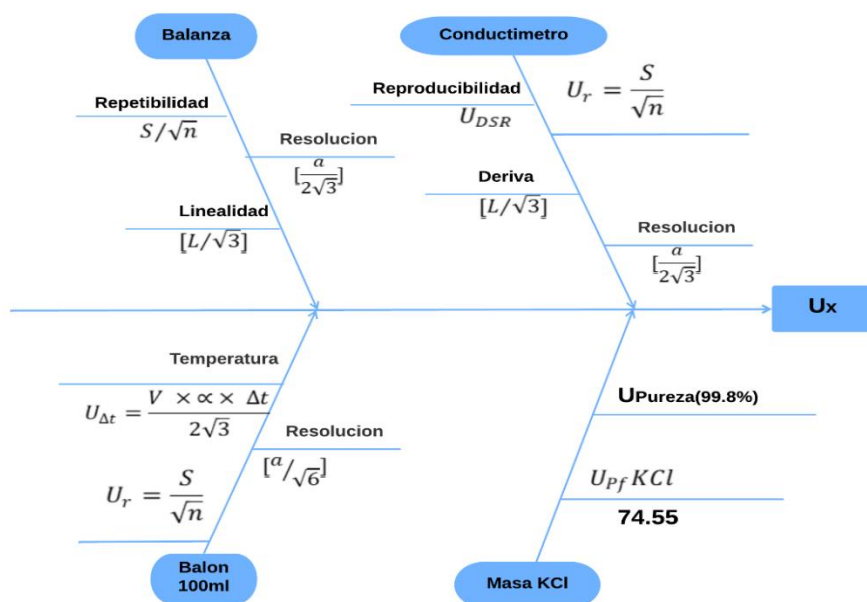


3. **Concentración de solución:** la homogeneidad y la concentración de la solución medida afectan la conductividad. Si la solución no está bien mezclada o hay precipitaciones, puede haber error en la medición.
4. **Interferencias Químicas:** la presencia de otros iones en la solución puede interferir con la medición de la conductividad. Algunas sustancias pueden aumentar o disminuir la conductividad de la muestra.
5. **Electrodos:** el tipo y la condición del electrodo utilizado (por ejemplo: su limpieza, superficie y material) pueden afectar la medición. Los electrodos sucios o desgastados pueden introducir errores.
6. **Condiciones ambientales:** factores como la humedad y la presión atmosférica también pueden influir en las mediciones, aunque su efecto suele ser menor comparado con otros factores. (George Lazar, Claudio campureanu; Ioan Cirneanu, Danut Vaireanu, 2017)

En la siguiente figura se observan las fuentes de incertidumbre correspondientes al proceso de medición de conductividad eléctrica.

Figura 7

Diagrama de causa y efecto de las fuentes de incertidumbre





4 DISEÑO METODOLOGICO

4.1 Tipo de estudio: Estudio experimental.

4.2 Población de estudio: Agua potable.

4.3 Área de estudio: Ambiental. La presente investigación se desarrolló en la ciudad de León

4.4 Muestra: En el presente trabajo la muestra se tomará en un punto fijo de la red de distribución de agua potable en el edificio Leonel Rugama del Área de conocimiento de Ciencias y Tecnología de la UNAN-León.

4.5 Recolección de muestra

1. Antes de recolectar la muestra, se dejará fluir libremente el líquido durante 30 segundos a flujo constante, con el objeto de captar el agua de interés y no aquella que pudiera estar retenida en las tuberías y puntos muertos del sistema de la red de distribución.
2. Se enjuagará de dos a tres veces el frasco recolector con la muestra objeto de estudio, para impregnar las paredes internas del recipiente con la misma.
3. Se recolectará una cantidad aproximada de $\frac{1}{2}$ L de muestra, evitando que especies extrañas sean atrapadas en su interior y puedan alterarla.

4.6 Equipos, Reactivos, Cristalería y Materiales

✓ **Equipos**

- Balanza analítica Sartorius Tipo AC210S
- Conductímetro LabQuest-Vernier

✓ **Reactivos**

- Soluciones estándares de conductividad 1413 μ S/cm y 12.88 mS/cm.
- Cloruro de potasio: Marca FISHER pureza del 99.8%.
- Agua destilada

✓ **Cristalería**

- Envases esterilizados de vidrio o plástico de 1L
- Balón aforado Pyrex de 100 ml
- Beakers de 50 y 100 ml
- Termómetro de mercurio con escala -10 a 250 °C



✓ **Materiales:**

- Espátula
- Gotero
- Papel Toalla
- Pizetas
- Papel Kleenex

4.7 Proceso de verificación de la calibración interna de la balanza analítica

El proceso de verificación de la calibración de la balanza analítica se realizó empleando el manual de uso del fabricante, y una serie patrones de masas certificadas.

a) Medición de la repetibilidad.

Se coloca una carga en el centro del platillo y se mide por 15 veces, con lecturas de carga mínima entre cada una de las veces. Esta prueba se ejecuta al 50% y al 100% de la escala total. Nota 1: en todas las pruebas que se realicen en los instrumentos para pesar una vez iniciada cualquier prueba no se puede suspender la prueba y reanudarla posteriormente, así como tampoco realizar ajustes a cero a mitad de las pruebas. Antes de tomar la primera lectura si se recomienda ajustar a cero, pero una vez iniciada la prueba ya no se realiza ningún ajuste a cero. Los resultados de lectura obtenidos se registran bitácora para lecturas de medición.

b) Medición de la linealidad

Con esta prueba se verifica en todo el intervalo de pesada, de la indicación del instrumento sea acorde con la carga aplicada dentro de los límites especificados por el fabricante.

La prueba consiste en realizar un mínimo de 20 pesadas, por lo cual se realizaron 6 cargas ascendentes y 6 cargas descendentes por triplicado, equidistantes en todo el campo de pesada, con las lecturas de la carga mínima (cero) intercaladas. Los resultados se registran para lecturas de medición de trabajo.

Nota: Tarar la Balanza Analítica después de finalizar cada uno de los protocolos de verificación.



4.8 Proceso de verificación de la calibración del material volumétrico

Para este proceso se manipularon un matraz volumétrico marca Pyrex clase A de capacidad 100 mL. Se efectuaron 30 repeticiones de lecturas de masas del matraz estando vacío y aforado con agua. En ésta última, se midió al mismo tiempo la temperatura del agua utilizada. La densidad del aire se obtuvo de tablas en correspondencia a 30 °C y a 86 msnm aproximadamente. La densidad de las pesas de referencia es la reportada por el fabricante. La densidad del agua se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$d_{agua}(g/L) = b_0 + (b_1 t) + (b_2 t^2) + (b_3 t^3) + (b_4 t^4) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , y b_4 son valores de constantes establecidos en tablas a diferentes temperaturas; y t , es la temperatura del agua en el momento de la verificación (°C)

Debido a que esta ecuación expresa la densidad del agua en g/L, se emplea un factor de 1000 para expresarla en g/cm³.

Posteriormente, se calcula la masa de agua corregida relacionando las densidades del aire, agua y pesas patrón, por medio de la siguiente ecuación:

$$m_{a,corr.} = m_{aa} \left[1 + d_{aire} \left(\frac{1}{d_{agua}} - \frac{1}{d_{pesas}} \right) \right] \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$m_{a,corr.}$: es la masa del agua corregida en g.

m_{aa} : es la masa del agua aparente en g.

d_{aire} : es la densidad del aire en g/cm³, a una temperatura específica establecida en tablas.

d_{agua} : es la densidad del agua calculada con la ecuación 10 y expresada en g/cm³.

d_{pesas} : es la densidad de las pesas patrón empleados para verificar la calibración de la balanza que en general es 8.0 g/cm³.

El volumen sesgado de material volumétrico se calcula mediante:

$$V_s = \frac{d_{agua}(g/cm^3)}{m_{a,corr.}(g)} \quad \text{Ecuación 12}$$

Finalmente se calcula el volumen real del material volumétrico con ayuda de la siguiente ecuación:

$$V_{mv} = V_n - V_s \quad \text{Ecuación 13}$$



Donde:

V_{mv} : es el volumen real del material volumétrico.

V_n : es el volumen nominal del material volumétrico.

V_s : es el volumen sesgado.

4.9 Preparación de la solución electrolito estándar de KCl 0.1M

Para la preparación de esta disolución se tomó una cantidad de la sal y se llevó al horno por 24 horas a una temperatura aproximada de 112 °C. Después, se pasó a un desecador durante 23 horas hasta peso constante. Luego se pesó **0.7419 g de KCl** y se disolvió en 50 ml de agua destilada. Por último, se completó a volumen de 100 ml en un matraz aforado.

Al final la concentración de la solución de trabajo fue de **0.0995 M**.

4.10 Verificación de la respuesta del sistema conductimétrico

En cuanto a la verificación del sistema conductimétrico formado la interfaz LabQuest1 y la sonda de conductividad, ambas de la marca vernier, ésta se realizó en dos momentos:

- a. Verificar las respuestas del conductímetro ante soluciones estándares de conductividad en el orden de $1413\mu\text{S/cm} \pm 0.0025$ y $12.88 \pm 0.0150 \text{ mS/cm}$ ambas a 25 °C, mediante lecturas repetidas de conductividad.
- b. Realizar lecturas repetidas de conductividad de la disolución de KCl 0.0995M.

4.11 Procedimiento de medición de la conductividad eléctrica en la muestra de agua

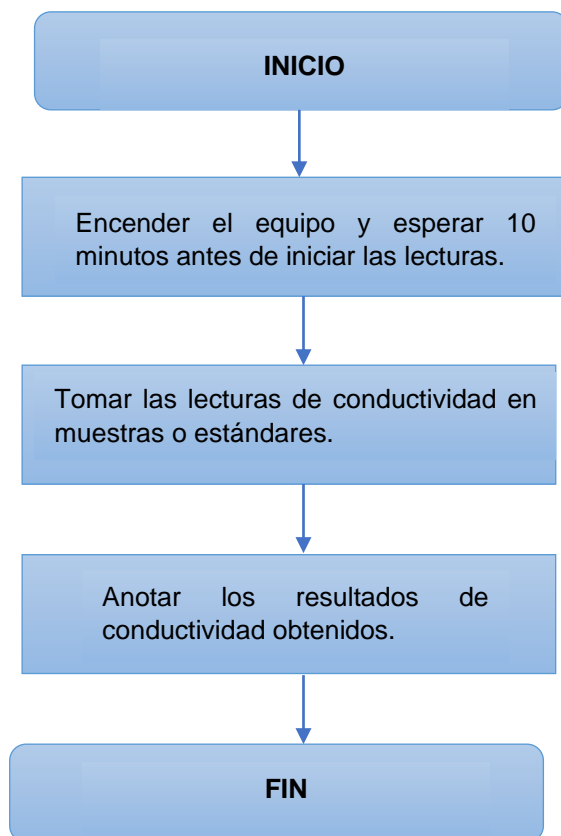
Para este ensayo se tomaron lecturas de muestras de agua potable durante 2 días. Por día se tomó 5 muestras en diferentes horas y se realizó 20 repeticiones por muestra.

Todas las lecturas se efectuaron tomando en cuenta las recomendaciones del fabricante.



Figura 8

Flujograma de procedimiento para las mediciones de Conductividad Eléctrica empleando el equipo LabQuest1.



4.12 Procedimiento para estimar la incertidumbre en una medición

En general, el proceso de medida se divide en partes fundamentales, cada una de estas partes fundamentales se subdivide a la vez en contribuciones más pequeñas. Posteriormente, se calcula la incertidumbre de cada una de las partes y se combinan para obtener la incertidumbre global del proceso de medida. Este proceso se realizó según lo indicado en la Guía ISO GUM 2008.

Primero que todo, se deriva el modelo matemático, se identifican las fuentes de incertidumbres (las de tipo A, obtenidas a partir de una serie de observaciones y las de tipo B, obtenidas a partir de las distribuciones normal, rectangular o triangular), se cuantifican las incertidumbres, se hace un balance de las incertidumbres, se combinan las incertidumbres a través de la ley



de la propagación de la incertidumbre, se revisa si no hay incongruencias para reevaluar los componentes de la incertidumbre, se calcula el intervalo de confianza especificando el factor de cobertura y finalmente se calcula la incertidumbre expandida multiplicando la incertidumbre estándar combinada por un factor de cobertura " $k = 2$ " si el valor de significancia es 95.45% o un factor de cobertura " $k = 1.96$ " si valor de significancia es del 95%, y se reportan los resultados con el número de cifras significativas correcto.



5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Verificación del buen funcionamiento de la balanza analítica

Antes de llevar a cabo los procesos de pesajes se procedió a verificar el buen funcionamiento del equipo.

La verificación del buen funcionamiento de la balanza analítica se realizó utilizando masas patrón certificadas de 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 g, mediante las siguientes pruebas: linealidad, repetibilidad.

5.1.1 Prueba de repetibilidad

Para esta prueba se emplearon las masas patrones certificadas de 100g, 50g y 1g, haciendo un total de 15 lecturas de cada una. En la tabla 1, se aprecian los valores, los promedios y la desviación estándar obtenida.

Tabla 1
Resultados de prueba de repetibilidad

n	Masa 1 g	Masa 50 g	Masa 100 g
1	1.0027	50.0089	100.0336
2	1.0027	50.0088	100.0337
3	1.0027	50.0088	100.0336
4	1.0026	50.0089	100.0335
5	1.0028	50.0088	100.0335
6	1.0027	50.0088	100.0337
7	1.0027	50.0087	100.0336
8	1.0027	50.0088	100.0337
9	1.0027	50.0089	100.0335
10	1.0027	50.0088	100.0335
11	1.0026	50.0089	100.0334
12	1.0027	50.0088	100.0335
13	1.0027	50.0087	100.0332
14	1.0026	50.0088	100.0334
15	1.0026	50.0087	100.0335
Promedio	1.00268	50.00881	100.03353
STD (Sr)	5.60612E-05	7.04E-05	1.33E-04



Se puede observar que las diferencias entre los promedios y los valores nominales de las masas patrones son despreciables, y las desviaciones en el orden de 10^{-04} y 10^{-05} . Indican que los valores de las repeticiones son todos del mismo conjunto de datos. De esto, se puede inferir que la variación en la repuesta de la balanza ante la medición de una misma masa no es significativa.

5.1.2. Prueba de linealidad

En esta prueba se emplearon masas patrones certificadas de 1g, 2g, 5g, 10g, 20g, 50g, y 100g. Los pesajes se realizaron uno a la vez por sextuplicado. En la tabla 2 se muestran los resultados.

Tabla 2

Resultados de prueba de linealidad

M.P (g)	Repeticiones (n=6)						Prom.	DesvStd
1	1.0026	1.0027	1.0026	1.0028	1.0027	1.0028	1.0027	8.944E-05
2	2.0027	2.0029	2.0028	2.0028	2.0029	2.0028	2.0028	7.528E-05
5	5.0077	5.0078	5.0076	5.0077	5.0076	5.0076	5.0077	8.165E-05
10	10.0009	10.0009	10.0008	10.0009	10.0009	10.0009	10.0009	4.082E-05
20	20.0005	20.0006	20.0005	20.0005	20.0005	20.0004	20.0005	6.325E-05
50	50.0088	50.0087	50.0088	50.0088	50.0087	50.0089	50.0088	7.528E-05
100	100.0334	100.0333	100.0336	100.0335	100.0333	100.0335	100.0334	1.21E-04

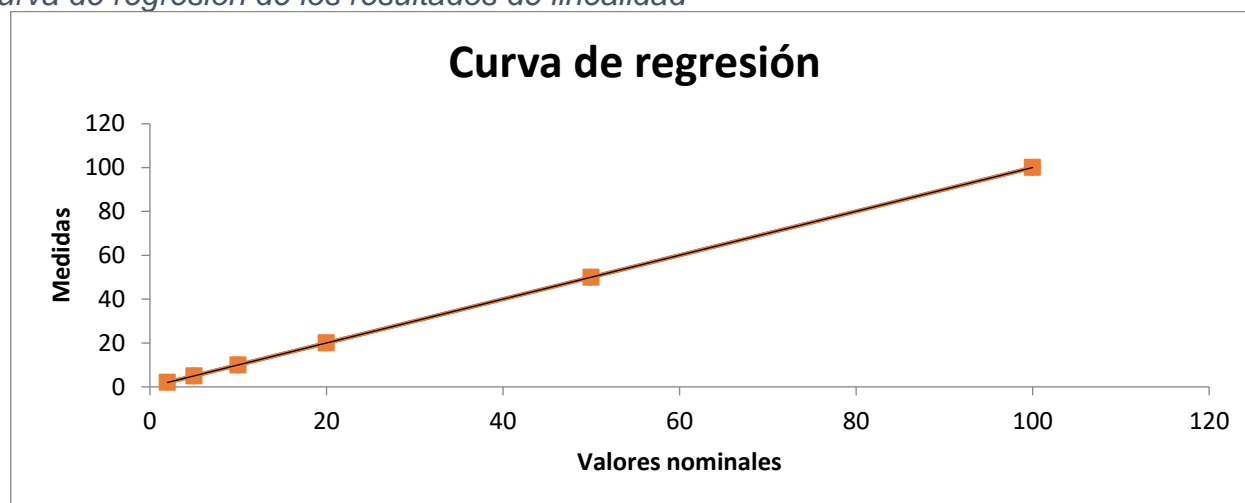
Se puede apreciar que las respuestas de la balanza son congruentes con los valores de las masas patrones empleadas como referencia, y que por lo tanto no existe diferencia significativa para con los promedios de las lecturas.

Así mismo los datos estadísticos de regresión indican una buena correlación entre las masas y por consiguiente una buena linealidad. Ver tabla 3 y figura 9.

Tabla 3
Datos estadísticos de la prueba de linealidad

Coeficiente de correlación múltiple	0.999999991075231
Coeficiente de determinación R^2	0.999999982150461
R^2 ajustado	0.999999977688076
Error típico	0.00567027804797753
Observaciones	6

Figura 9
Curva de regresión de los resultados de linealidad



Por otro lado, el análisis de ANOVA de un factor arroja un valor de Fisher calculado (F) mucho mayor que el valor crítico de Fisher ($F_{\text{tab.}}$), indicando que no existe variabilidad entre los datos, cuya pendiente tiende a 1 con un valor de significancia del 95%, presentando una excelente linealidad. Ver tabla 4.



Tabla 4
Análisis de anova de un factor

ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	1	7985.47584	7985.47584	296851 585.2	1.25013 E-20			
Residuos	5	0.0001345	2.6901E-05					
Total	6	7985.47598						
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
b0	0.00029 6375	0.00250484	0.11832103	0.91041 9774	- 0.00614 251	0.00673 5258	- 0.00614 2509	0.006735 258
b1	1.00028 9319	5.8057E-05	17229.3815	1.25013 E-20	1.00014 0079	1.00043 856	1.00014 0079	1.000438 56

5.1.3. Cálculos de las incertidumbres asociadas a las pesadas con la balanza

Sartorius AC210s

Los resultados de los cálculos de las incertidumbres asociadas a las pesadas en la balanza Sartorius AC210s, se muestran en la tabla 5 donde se combinó todos los tipos de fuentes de incertidumbre involucrados en el proceso.

Tabla 5
Resultados de los cálculos de incertidumbre de la balanza.

Fuente	Incertidumbre	Masa 1 g	Masa 50 g	Masa 100 g
Resolución $a = \pm 0.001$	$U_a = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	0.000288675	0.000288675	0.000288675
Repetibilidad $S_r; n = 15$	$U_r = \frac{S_r}{\sqrt{n}}$	1.44749E-05	1.81703E-05	3.44572E-05
Deriva $L = 0.001/h$	$U_L = \frac{L}{\sqrt{3}}$	0.00057735	0.00057735	0.00057735
Balanza	$U_B = \sqrt{\left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + 2\left(\frac{L}{\sqrt{3}}\right)^2}$	0.000866146	0.000866216	0.000866711



5.2. Verificación de la calibración del matraz volumétrico PYREX de 100 mL

A continuación, en la tabla 6 se muestran los datos y valores utilizados en el proceso de verificación de la calibración del matraz volumétrico empleado en la preparación de la solución de KCl 0.0995M.

Tabla 6

Datos de constantes y cálculos de la calibración del matraz volumétrico PYREX de 100 mL.

Material Volumétrico	Matraz
Valor Nominal (mL)	100 mL
Temperatura del agua, °C	30
Presión barométrica (atm.)	1
Densidad de pesas patron (g/cm ³)	8
Densidad del aire, d_{aire} (g/cm ³)	0.001164
Constante b0	999.85308
Constante b1	0.0632693
Constante b2	-0.0085238
Constante b3	6.943E-05
Constante b4	6.935E-06
Densidad del agua, d_{agua} (g/L)	1001.5716
Densidad del agua, d_{agua} (g/cm ³)	1.0015716

Como se puede ver, se utilizó un balón aforado de 100 ml marca PYREX Clase A, el cual se pesó vacío y aforado con agua. Se determinó la masa de agua, por medición directa repitiendo todo el proceso 30 veces para minimizar el error e incrementar la precisión de los datos. En la tabla 7 se muestran los resultados.



Tabla 7

Resultados de la calibración del matraz volumétrico PYREX de 100 mL

Rep.	masa balón vacío (m _b , vacío)	masa balón+H ₂ O (m _b , H ₂ O)	masa agua aparente (m _{H2O})	masa H ₂ O corregida (m _{H2O} , corr.)	Volumen Sesgado (mL)	Volumen balón (mL)
1	62.1864	161.6674	99.4810	99.58213969	0.010057744	99.98994226
2	62.1863	161.6671	99.4808	99.58193949	0.010057764	99.98994224
3	62.1863	161.6714	99.4851	99.58624386	0.010057329	99.98994267
4	62.1865	161.6758	99.4893	99.59044813	0.010056905	99.9899431
5	62.1864	161.6751	99.4887	99.58984752	0.010056965	99.98994303
6	62.1863	161.6706	99.4843	99.58544305	0.01005741	99.98994259
7	62.1863	161.6609	99.4746	99.57573319	0.010058391	99.98994161
8	62.1863	161.6777	99.4914	99.59255027	0.010056692	99.98994331
9	62.1864	161.6655	99.4791	99.58023776	0.010057936	99.98994206
10	62.1864	161.6794	99.4930	99.59415189	0.010056531	99.98994347
11	62.1864	161.6734	99.4870	99.58814579	0.010057137	99.98994286
12	62.1863	161.6768	99.4905	99.59164935	0.010056783	99.98994322
13	62.1863	161.6684	99.4821	99.58324081	0.010057633	99.98994237
14	62.1863	161.6658	99.4795	99.58063817	0.010057895	99.9899421
15	62.1863	161.6763	99.4900	99.59114884	0.010056834	99.98994317
16	62.1863	161.6777	99.4914	99.59255027	0.010056692	99.98994331
17	62.1864	161.6704	99.4840	99.58514274	0.01005744	99.98994256
18	62.1864	161.6732	99.4868	99.58794559	0.010057157	99.98994284
19	62.1863	161.6694	99.4831	99.58424183	0.010057531	99.98994247
20	62.1863	161.6797	99.4934	99.5945523	0.01005649	99.98994351
21	62.1864	161.6781	99.4917	99.59285057	0.010056662	99.98994334
22	62.1864	161.6771	99.4907	99.59184956	0.010056763	99.98994324
23	62.1864	161.6759	99.4895	99.59064834	0.010056884	99.98994312
24	62.1864	161.6763	99.4899	99.59104874	0.010056844	99.98994316
25	62.1865	161.6611	99.4746	99.57573319	0.010058391	99.98994161
26	62.1864	161.6724	99.4860	99.58714478	0.010057238	99.98994276
27	62.1864	161.6744	99.4880	99.58914681	0.010057036	99.98994296
28	62.1863	161.6713	99.4850	99.58614376	0.010057339	99.98994266
29	62.1863	161.6761	99.4898	99.59094864	0.010056854	99.98994315
30	62.1863	161.6794	99.4931	99.594252	0.010056521	99.98994348
		Media	99.4864	99.5876	0.010057193	99.98994281
		DesvStd	0.005243	0.005248371	5.30044E-07	5.30044E-07
		VAR.	2.749E-05	2.75454E-05	2.80947E-13	2.80947E-13
				CV	0.005270299	5.30097E-07



5.2.1. Cálculos de las incertidumbres asociadas a la verificación de la calibración del matraz volumétrico marca Pyrex clase A de 100 mL

Para este cálculo se combinó todos los tipos de fuentes de incertidumbre involucrados en el proceso.

Tabla 8

Resultados del cálculo de las incertidumbres asociadas a la verificación de la calibración del matraz volumétrico PYREX de 100 mL

Fuente	Incertidumbre	Volumétrico
Resolución $a = \pm 0.08$	$U_a = \frac{a}{\sqrt{6}}$	0.032659863
Repetibilidad $S_r, n = 30$	$U_r = \frac{S_r}{\sqrt{n}}$	9.67724E-08
Expansión cúbica del líquido (H_2O), Δt	$U_{\Delta t} = \frac{V\alpha\Delta T}{2\sqrt{3}}$	0.000290326
Matraz	$U_v = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{6}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{V\alpha\Delta T}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	0.032661154

5.3. Resultados del cálculo de la masa de KCl para la preparación de la solución electrolito estándar de KCl 0.0995M

Los resultados de la cuantificación de la masa para la preparación de la solución electrolito KCl, se obtuvieron mediante el cálculo de los coeficientes de sensibilidad empleando el software Maple 18 para modelos matemáticos a partir de la ecuación 9; y de los pesos atómicos de los elementos constituyentes del KCl según la IUPAC:

$$m_{KCl} = M_{KCl} \cdot V_{KCl} \cdot Pf_{KCl} \cdot P_{KCl}$$

Donde:

m_{KCl} = masa de KCl que se debe pesar.

$M_{KCl} = 0.0995$



$$V_{KCl} = 0.1 \text{ L}$$

$$P_{fKCl} = (39.0983 + 35.4527) = 74.551$$

$$P_{KCl} = \text{pureza del KCl, 99.8\%}$$

$$m_{KCl} = M_{KCl} \cdot V_{KCl} \cdot P_{fKCl} \cdot P_{KCl} = (0.0995 * 0.1 * 74.551 * 0.998) = \mathbf{0.7403}$$

5.3.1 Cálculos de los coeficientes de sensibilidad (Ci) asociados a la cantidad de masa de KCl

Los coeficientes de sensibilidad se determinaron utilizando el software de modelización y simulación matemática MAPLE 18™ a partir de la ecuación 9.

$$cM_{KCl} = \frac{\partial m_{KCl}}{\partial M_{KCl}} = V_{KCl} P_{fKCl} P_{KCl} \quad \text{Ecuación 14}$$

$$cM_{KCl} = \frac{\partial m_{KCl}}{\partial M_{KCl}} = V_{KCl} P_{fKCl} P_{KCl} = (0.1 * 74.551 * 0.9980) = \mathbf{7.440189800}$$

$$cV_{KCl} = \frac{\partial m_{KCl}}{\partial V_{KCl}} = M_{KCl} P_{fKCl} P_{KCl} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$cV_{KCl} = \frac{\partial m_{KCl}}{\partial V_{KCl}} = M_{KCl} P_{fKCl} P_{KCl} = (0.0995 * 74.551 * 0.9980) = \mathbf{7.402988851}$$

$$cP_{fKCl} = \frac{\partial m_{KCl}}{\partial P_{fKCl}} = M_{KCl} V_{KCl} P_{KCl} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$cP_{fKCl} = \frac{\partial m_{KCl}}{\partial P_{fKCl}} = M_{KCl} V_{KCl} P_{KCl} = (0.0995 * 0.1 * 0.9980) = \mathbf{0.009930100}$$

$$cP_{KCl} = \frac{\partial m_{KCl}}{\partial P_{KCl}} = M_{KCl} V_{KCl} P_{fKCl} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$cP_{KCl} = \frac{\partial m_{KCl}}{\partial P_{KCl}} = M_{KCl} V_{KCl} P_{fKCl} = (0.0995 * 0.1 * 74.551) = \mathbf{0.741782450}$$



Donde:

C_M = Coeficiente de sensibilidad de la molaridad del KCl.

C_V = Coeficiente de sensibilidad del volumen a preparar de KCl.

C_{Pf} = Coeficiente de sensibilidad del peso fórmula del KCl.

C_P = Coeficiente de sensibilidad debido a la pureza del KCl.

5.3.2. Cálculo de la incertidumbre asociada a la masa de KCl

Para este cálculo, se aplicó la ley de propagación del error. Se combinaron todas las fuentes de incertidumbre del proceso con sus respectivos coeficientes de sensibilidad.

$$U_{m,kcl} = \sqrt{(C_M)^2(U_M)^2 + (C_V)^2(U_V)^2 + (C_{pf})^2(U_{Pf})^2 + (C_P)^2(U_P)^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

En la tabla a continuación se muestran los resultados de los cálculos de los productos de las fuentes de incertidumbre con sus respectivos coeficientes de sensibilidad asociadas a la masa de KCl.

Tabla 9

Resultados del cálculo de las incertidumbres asociadas a la masa de KCl a partir de la ecuación 9

Fuente	(Ci)	(Ui)	(CiUi)	(Ci*Ui) ²
Molaridad	7.440189800	0.0005	0.00372755	1.38946E-05
Volumen	7.402988851	0.0327	0.242562861	0.058836742
Peso fórmula	0.009930100	0.001	0.00000995	9.90025E-11
Pureza	0.741782450	0.20	0.14835649	0.022009648

$$U_{m,kcl} = \sqrt{(7.440189800)^2(0.0005)^2 + (7.402988851)^2(0.0327)^2 + (0.009930100)^2(0.001)^2 + (0.741782450)^2(0.20)^2}$$

$$U_{m,kcl} = \sqrt{1.38946E - 05 + 0.058836742 + 9.90025E - 11 + 0.022009648}$$

$$U_{m,kcl} = \sqrt{0.080625117}$$

$$U_{m,kcl} = \mathbf{0.283945624}$$



5.3.3. Combinación de incertidumbres asociadas a la preparación de la solución de KCl 0.0995M

Para este caso, la tabla 10 exhibe los datos para la combinación de las incertidumbres debido a la balanza por el proceso de pesada, la incertidumbre del matraz relacionada a la preparación del volumen de KCl, y la incertidumbre de la masa del KCl tomando en cuenta la pureza y los pesos atómicos de la fórmula de la sustancia.

Tabla 10

Combinación de incertidumbres asociadas a la preparación de la solución electrolítica KCl

Fuente	U _i	
Balanza	$U_B = \sqrt{\left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + 2\left(\frac{L}{\sqrt{3}}\right)^2}$	0.000866146
Matraz	$U_V = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{6}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{V\alpha\Delta T}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	0.032661154
masa del KCl	$U_{m,kcl} = \sqrt{(C_M)^2(U_M)^2 + (C_V)^2(U_V)^2 + (C_{pf})^2(U_{Pf})^2 + (C_P)^2(U_P)^2}$	0.283945624

$$U_{C_{KCl}} = \sqrt{U_B^2 + U_{V,KCl}^2 + U_{m,KCl}^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$U_{C_{KCl}} = \sqrt{(0.000866146)^2 + (0.032661154)^2 + (0.283945624)^2} = \mathbf{0.2858192061}$$

5.4. Resultados de la verificación de respuesta de la interfaz LabQuest1 con estándares de referencia

Para evaluar las respuestas de la interfaz LabQuest1, se emplearon estándares certificados de $1413 \pm 0.0025 \mu\text{S/cm}$ y $12.88 \pm 0.015 \text{ mS/cm}$. Se realizaron en total 30 repeticiones de lecturas por estándar, a las cuales se les determinó el promedio y la desviación estándar. En la tabla 11 se pueden observar dichos resultados.



Tabla 11
Lectura de estándares certificados.

Repeticiones	1413 $\mu\text{S/cm}$	12.88 mS/cm	
1	1377	12879	12.88
2	1360	12945	12.95
3	1375	12935	12.94
4	1379	12945	12.95
5	1380	12964	12.96
6	1381	12907	12.91
7	1382	12879	12.88
8	1382	12888	12.89
9	1381	12898	12.90
10	1377	12907	12.91
11	1377	12926	12.93
12	1374	12935	12.94
13	1375	12898	12.90
14	1379	12926	12.93
15	1378	12935	12.94
16	1377	12907	12.91
17	1380	12917	12.92
18	1379	12898	12.90
19	1379	12879	12.88
20	1379	12907	12.91
21	1379	12907	12.91
22	1378	12879	12.88
23	1380	12879	12.88
24	1370	12898	12.90
25	1374	12865	12.87
26	1379	12869	12.87
27	1376	12869	12.87
28	1378	12860	12.86
29	1378	12869	12.87
30	1377	12860	12.86
Prom.	1377		12.90
DesvStd	4.16333200		0.02837556



5.4.1. Cálculo de incertidumbres asociadas a la interfaz LabQuest1 empleando soluciones de referencia de conductividad

Este cálculo se realizó en base a las respuestas de la interfaz LabQuest1 con soluciones de referencia. Ver tabla 12.

Tabla 12

Cálculo de incertidumbres asociadas a la interfaz LabQuest1 empleando soluciones de referencia de conductividad

Fuente	Incertidumbres	1413 $\mu\text{S/cm}$	12.88 mS/cm
Resolución $a = \pm 0.01$	$U_a = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	0.00288675	0.00288675
Repetibilidad $S_r; n = 30$	$U_r = \frac{S_r}{\sqrt{n}}$	0.76011695	0.00518064
Deriva $L = 0.030/\text{h}$	$U_L = \frac{L}{\sqrt{3}}$	0.01732051	0.01732051
LabQuest1	$U_{LQ1} = \sqrt{\left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{L}{\sqrt{3}}\right)^2}$	0.76031974	0.01830771

5.4.2. Resultados de la verificación de respuesta de la interfaz LabQuest1 con solución preparada de KCl 0.0995 M

También se evaluó las respuestas de la interfaz, mediante lecturas de una solución preparada de KCl 0.0995 M, para la cual se realizaron 30 repeticiones cuyos resultados se presentan en la tabla 13.



Tabla 13

Resultados de la verificación de respuesta de la interfaz LabQuest1 con estándar preparado de KCl

Repeticiones	$\mu\text{S/cm}$	mS/cm
1	11806	11.806
2	11825	11.825
3	11835	11.835
4	11816	11.816
5	11825	11.825
6	11825	11.825
7	11825	11.825
8	11825	11.825
9	11835	11.835
10	11835	11.835
11	11816	11.816
12	11816	11.816
13	11835	11.835
14	11825	11.825
15	11825	11.825
16	11816	11.816
17	11825	11.825
18	11844	11.844
19	11835	11.835
20	11816	11.816
21	11825	11.825
22	11835	11.835
23	11825	11.825
24	11825	11.825
25	11835	11.835
26	11815	11.815
27	11806	11.806
28	11854	11.854
29	11844	11.844
30	11835	11.835
Prom.		11.82680
DesvStd		0.01097458



5.4.3. Cálculo de incertidumbres asociadas a la interfaz LabQuest1 empleando solución electrolítica preparada de KCl 0.0995M

Cálculos soportados en la capacidad de respuesta de la interfaz LabQuest1 frente a la solución preparada de KCl 0.0995M. Ver tabla 14.

Tabla 14

Resultados de cálculos de incertidumbres asociadas a la interfaz LabQuest1

Fuente	Incertidumbres	
Resolución $a = \pm 0.01$	$U_a = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	0.00288675
Repetibilidad $S_r; n = 30$	$U_r = \frac{S_r}{\sqrt{n}}$	0.00200368
Deriva $L = 0.030/h$	$U_L = \frac{L}{\sqrt{3}}$	0.01732051

$$U_{LQ1} = \sqrt{\left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{L}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$U_{LQ1} = \sqrt{(0.00288675)^2 + (0.00200368)^2 + (0.01732051)^2} = \mathbf{0.01767337}$$

Comparando los valores de incertidumbre de la interfaz LabQuest1 apoyados en la capacidad de respuesta del mismo frente a las soluciones de referencia y a la solución preparada, se puede notar que el dato de incertidumbre (0.01767337) de la interfaz LabQuest1 empleando solución preparada de KCl es menor que el valor de la incertidumbre (0.01830771) de la interfaz LabQuest1 fundamentada en las respuestas con las soluciones de referencia. Esto indica que hubo mayor precisión en las lecturas con la solución preparada, y pudo ser debido a la fecha de caducidad de las soluciones de referencia. Sin embargo, en cuanto a exactitud, las lecturas (12.90 mS/cm) de las soluciones de referencia estuvieron más cercanas al valor reportado por la bibliografía (12.88 mS/cm). Las lecturas (11.83 mS/cm) referentes a la solución preparada, están desfasadas en aproximadamente una unidad respecto a la bibliografía. En general ambas respuestas se aceptan puesto que conocemos el sesgo y pueden corregirse, además de ello, sus diferencias se consideran despreciables.



5.5. Mediciones de conductividad eléctrica en la muestra de agua potable

Las mediciones realizadas con el conductímetro LabQuest1 en 2 días a diferentes horas del día se muestran en las tablas 15 y 20.

Lecturas de conductividad eléctrica de la muestra de agua del día 18-06-24 por la mañana.

Para el primer día se realizaron 20 lecturas por muestra cada media hora entre las 10:00 am –12:00 m, cuyos valores y promedios de lecturas se encuentran reflejados en la tabla 15. Esta ligera variabilidad de los promedios de las lecturas pudo deberse principalmente a cambios bruscos en la temperatura. En estos valores, la ligera variación también es despreciable a pesar de presentar desviaciones estándares un poco mayores.

Tabla 15

Lecturas de conductividad eléctrica de agua el día 18-06-24

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Hora	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00
1	313	313	313	313	313
2	313	313	313	313	313
3	313	313	313	313	322
4	313	322	322	313	322
5	313	322	322	322	322
6	322	322	322	322	322
7	322	322	322	322	322
8	322	322	322	322	322
9	322	322	322	322	322
10	322	331	322	322	322
11	322	331	322	322	331
12	331	331	331	322	331
13	331	331	331	322	331
14	331	331	331	322	331
15	331	331	331	322	331
16	331	341	331	322	341
17	331	341	341	331	341



18	341	341	341	331	341
19	341	341	341	331	341
20	341	341	341	331	341
Promedio	325.3	328.1	326.7	322	328.1
Moda	322	322	322	322	322
DesvStd	9.61413433	9.70566845	9.31947593	5.83997116	9.25600801

Para comparar los promedios entre los grupos de la tabla 12, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA), se estableció las siguientes hipótesis:

Hipótesis

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Información del factor

Tabla 16

Resultados de Información de los factores

Factor	Niveles	Valores
Factor	5	Muestra 1, Muestra 2, Muestra 3, Muestra 4, Muestra 5

Medias

Tabla 17

Resultados de Medias de las muestras

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Muestra 1	20	325.30	9.61	(321.36, 329.24)
Muestra 2	20	328.10	9.71	(324.16, 332.04)
Muestra 3	20	326.70	9.32	(322.76, 330.64)
Muestra 4	20	322.00	5.84	(318.06, 325.94)
Muestra 5	20	328.10	9.26	(324.16, 332.04)

Desv.Est. agrupada = 8.86863

Análisis de Varianza

Tabla 18

Resultados del análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	4	515.8	128.96	1.64	0.171
Error	95	7472.0	78.65		
Total	99	7987.8			



El análisis de varianza arroja que no existe diferencia significativa entre las medias a un nivel de significancia del 95%, debido a que el valor de probabilidad **p** calculado (0.171) es mayor a 0.05, y el valor calculado 1.64 de la distribución de Fisher es menor que el valor crítico 224.6.

A continuación, la tabla 19 muestra las pruebas individuales de Fisher que compara por pares los promedios de los grupos, para identificar cuál de los grupos es diferente de los demás. El valor ajustado de probabilidad **p** indica que el promedio del par compuesto por Muestra 4 - Muestra 2 y el par Muestra 5 - Muestra 4, son diferentes, puesto que tienen un valor inferior al valor crítico de **p** = 0.05.

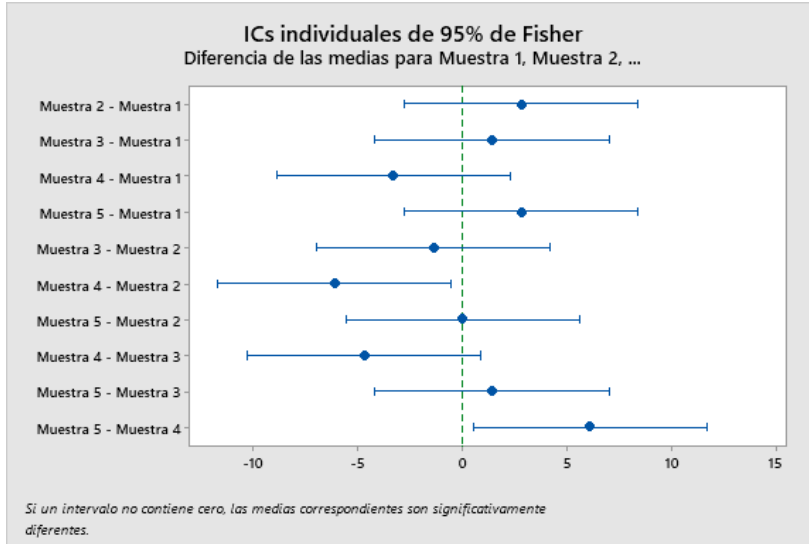
Tabla 19

Pruebas individuales de Fisher para diferencias de las medias

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	Error Estándar de la diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
Muestra 2 - Muestra 1	2.80	2.80	(-2.77, 8.37)	1.00	0.321
Muestra 3 - Muestra 1	1.40	2.80	(-4.17, 6.97)	0.50	0.619
Muestra 4 - Muestra 1	-3.30	2.80	(-8.87, 2.27)	-1.18	0.242
Muestra 5 - Muestra 1	2.80	2.80	(-2.77, 8.37)	1.00	0.321
Muestra 3 - Muestra 2	-1.40	2.80	(-6.97, 4.17)	-0.50	0.619
Muestra 4 - Muestra 2	-6.10	2.80	(-11.67, -0.53)	-2.18	0.032
Muestra 5 - Muestra 2	0.00	2.80	(-5.57, 5.57)	0.00	1.000
Muestra 4 - Muestra 3	-4.70	2.80	(-10.27, 0.87)	-1.68	0.097
Muestra 5 - Muestra 3	1.40	2.80	(-4.17, 6.97)	0.50	0.619
Muestra 5 - Muestra 4	6.10	2.80	(0.53, 11.67)	2.18	0.032

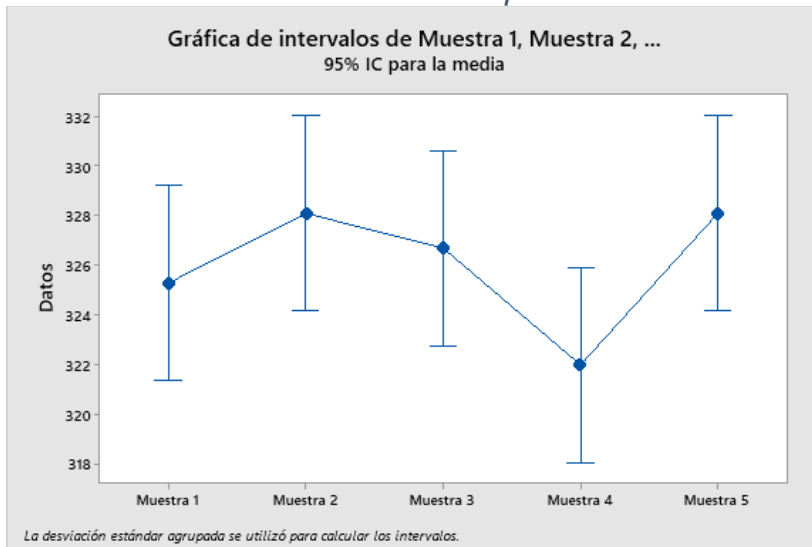
En la figura 10 (gráfico de intervalos individuales), se muestran las diferencias de cada una de las medias, se ve que dos de los intervalos no atraviesan cero, indicando que los promedios de las lecturas correspondientes a este intervalo son significativamente diferentes. No obstante, los valores que separan a los intervalos de la línea de cero son pequeños y a este nivel de confianza pueden despreciarse, y asumir que todos los promedios pertenecen al mismo conjunto de datos, tal y como lo expresa el análisis de varianza ANOVA. Por tanto, todas las medias son iguales.

Figura 10
Gráfico de intervalos individuales de diferencia de las medias



La siguiente figura presenta de manera gráfica los intervalos de los valores de cada serie de datos por muestra y sus promedios a 95% de nivel de significancia. Ver figura 11.

Figura 11
Gráfico de intervalos de confianza para las medias



En la figura 12, se muestran un conjunto de tres gráficos que presentan los resultados obtenidos en las muestras. Cada gráfico presenta un enfoque diferente. El primero es un gráfico de probabilidad normal que evalúa si los residuos siguen una distribución

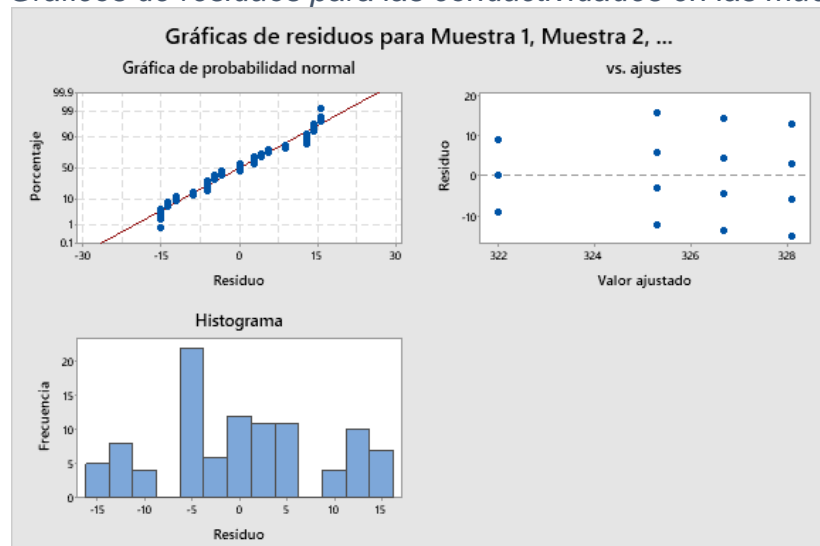
normal; el segundo es un gráfico de residuos ajustados que analiza la dispersión de los valores residuales e identifica las irregularidades en el modelo; y el ultimo, es un gráfico de histograma que ilustra la distribución de los residuos, proporcionando una visión de su simetría.

En cuanto a la gráfica de probabilidad normal los puntos de las muestras generalmente parecen seguir una línea recta, aunque hay unas desviaciones menores en los extremos. Esto sugiere que los residuos tienen una distribución aproximadamente normal.

En la gráfica de residuos vs ajustes los puntos parecen estar dispersos aleatoriamente en la gráfica alrededor del eje horizontal por lo tanto ninguna de las muestras parece tener una variabilidad sustancialmente diferente y no hay ningún valor atípico evidente. Esto indica que no hay una relación sistemática entre los residuos y los valores ajustados, lo cual es bueno porque sugiere que el modelo no omite ninguna tendencia. En la gráfica de histograma se presenta algo asimétrica, con una concentración alta de residuos cerca del centro, pero con datos en ambos extremos. Esto sugiere que, aunque la mayoría de residuos están alrededor del 0 puede presentar alguna desviación de la normalidad.

Figura 12

Gráficos de residuos para las conductividades en las muestras de agua.





Lecturas de conductividad eléctrica de la muestra de agua el día 19-06-24 por la tarde

Para el segundo día de estudio, también se realizaron 20 lecturas por muestra, recolectadas cada media hora durante dos horas (2:00 pm – 4:00 pm), cuyos valores y promedios de lecturas se encuentran reflejados en la tabla 20. En estos valores, la ligera variación también es despreciable a pesar de presentar desviaciones estándares un poco mayores. Ver tabla 20.

Tabla 20

Lecturas de conductividad eléctrica de agua el día 19-06-24

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Hora	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00
1	313	313	313	313	313
2	313	313	313	313	313
3	313	313	322	322	313
4	313	322	322	322	322
5	313	322	322	322	322
6	313	322	322	322	322
7	313	322	322	322	322
8	322	322	322	331	322
9	322	331	322	331	322
10	322	331	322	331	322
11	322	331	322	331	322
12	322	331	322	341	322
13	331	331	331	341	331
14	331	341	331	341	331
15	331	341	331	341	331
16	341	341	341	341	331
17	341	341	341	341	331
18	341	341	341	341	341
19	341	341	341	341	341
20	341	341	341	341	341
Promedio	324.95	329.55	327.2	331.45	325.75
Moda	313	341	322	341	322
DesvStd	11.3345072	10.3490401	9.37297347	10.1279966	8.73513775



Igual que en los resultados del día anterior, para comparar los promedios entre los grupos de la tabla 20, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) y se estableció las siguientes hipótesis:

Hipótesis

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0.05$

Información del factor

Tabla 21

Resultados de Información de los factores

Factor	Niveles	Valores
Factor	5	Muestra 1, Muestra 2, Muestra 3, Muestra 4, Muestra 5

Medias

Tabla 22

Resultados de Medias de las muestras

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Muestra 1	20	324.95	11.33	(320.50, 329.40)
Muestra 2	20	329.55	10.35	(325.10, 334.00)
Muestra 3	20	327.20	9.37	(322.75, 331.65)
Muestra 5	20	325.75	8.74	(321.30, 330.20)
Muestra 4	20	331.45	10.13	(327.00, 335.90)

Desv.Est. agrupada = 10.0230

Análisis de Varianza

Tabla 23

Resultados de análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	4	581.4	145.3	1.45	0.225
Error	95	9543.8	100.5		
Total	99	10125.2			

Para este grupo de datos el análisis de varianza a un nivel de significancia del 95% muestra un valor de $p = 0.225$ indicando que no hay deferencia significativa entre los promedios porque este valor es mayor a 0.05; y que, por lo tanto, se acepta la hipótesis de que todas las medias son iguales. Eso mismo refleja el valor critico de distribución de Fisher, puesto que el valor calculado es menor que el de tabla.



A continuación, la tabla 24 muestra las pruebas individuales de Fisher que compara por pares los promedios de los grupos, para identificar cuál de los grupos es diferente de los demás. El valor ajustado de probabilidad **p** indica que el promedio del par compuesto por Muestra 4 - Muestra 1, es diferente, puesto que tienen un valor inferior al valor crítico de **p** = 0.05. Ver tabla 24.

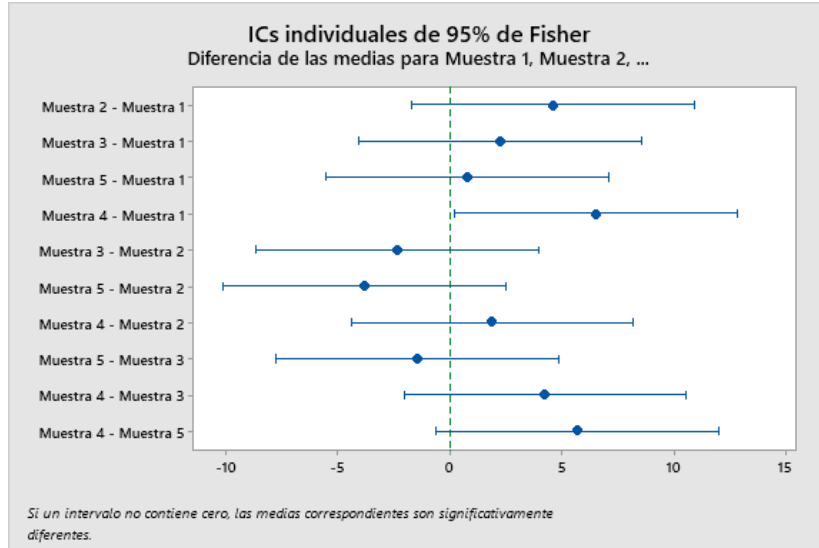
Tabla 24

Resultados de pruebas individuales de Fisher para diferencias significativas

Diferencia de niveles	Diferencia de las medias	Error Estándar de la diferencia	IC de 95%	Valor T	Valor p ajustado
Muestra 2 - Muestra 1	4.60	3.17	(-1.69, 10.89)	1.45	0.150
Muestra 3 - Muestra 1	2.25	3.17	(-4.04, 8.54)	0.71	0.480
Muestra 5 - Muestra 1	0.80	3.17	(-5.49, 7.09)	0.25	0.801
Muestra 4 - Muestra 1	6.50	3.17	(0.21, 12.79)	2.05	0.043
Muestra 3 - Muestra 2	-2.35	3.17	(-8.64, 3.94)	-0.74	0.460
Muestra 5 - Muestra 2	-3.80	3.17	(-10.09, 2.49)	-1.20	0.234
Muestra 4 - Muestra 2	1.90	3.17	(-4.39, 8.19)	0.60	0.550
Muestra 5 - Muestra 3	-1.45	3.17	(-7.74, 4.84)	-0.46	0.648
Muestra 4 - Muestra 3	4.25	3.17	(-2.04, 10.54)	1.34	0.183
Muestra 4 - Muestra 5	5.70	3.17	(-0.59, 11.99)	1.80	0.075

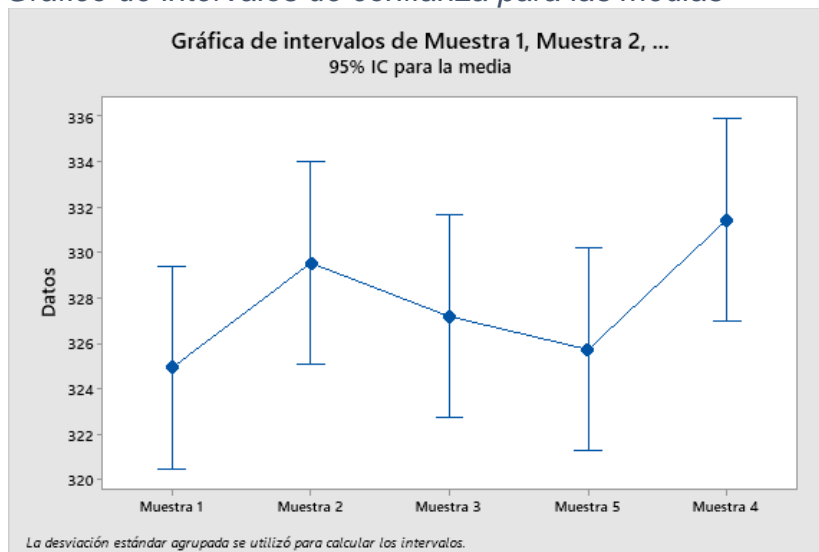
En la figura 13 (gráfico de intervalos individuales), se muestran las diferencias de cada una de las medias, se ve que uno de los intervalos no atraviesa cero, indicando que el promedio de las lecturas correspondientes a este intervalo es significativamente diferente. No obstante, el valor que separa al intervalo de la línea de cero es pequeño y a este nivel de confianza pueden despreciarse, y asumir que todos los promedios pertenecen al mismo conjunto de datos, tal y como lo expresa el análisis de varianza ANOVA. Por tanto, todas las medias son iguales.

Figura 13
Gráfico de intervalos individuales de diferencia de las medias



La siguiente figura presenta de manera gráfica los intervalos de los valores de cada serie de datos por muestra y sus promedios a 95% de nivel de significancia. Ver figura 14.

Figura 14
Gráfico de intervalos de confianza para las medias



En la gráfica de probabilidad normal los puntos de las muestras generalmente parecen seguir una línea recta, aunque hay unas desviaciones menores en los extremos. Esto sugiere que los residuos tienen una distribución aproximadamente distribuidos de forma

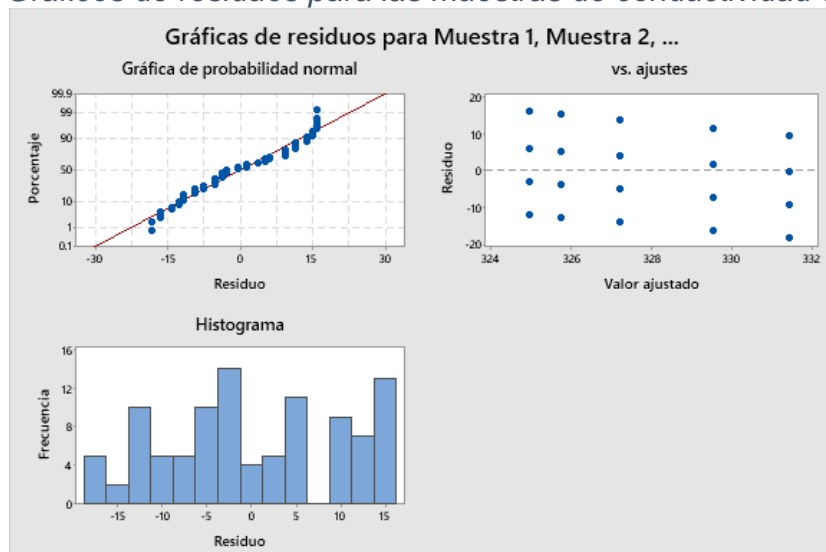
normal. Aunque debido a los valores alejados en los extremos existe la posibilidad de que sean valores atípicos o presentan una ligera asimetría en los datos

En la gráfica de residuos vs ajustes los puntos parecen estar dispersos aleatoriamente en la gráfica alrededor del eje horizontal por lo tanto ninguna de las muestras parece tener una variabilidad clara en los residuos en función de los valores ajustados. Sin embargo, se observan algunos puntos más alejados lo cual sugiere errores sistemáticos en ciertas áreas del rango de los valores ajustados.

En la gráfica de histograma se presenta más uniforme. Esto puede indicar que los residuos no están tan concentrados alrededor del cero y se observa más dispersión en los datos, lo cual se puede decir que existe una posible desviación de la normalidad. Ver figura 15.

Figura 15

Gráficos de residuos para las muestras de conductividad eléctrica en las muestras de agua.



5.5.1. Cálculo de las incertidumbres en la medición de la conductividad eléctrica en la muestra de agua

Para el cálculo de la incertidumbre de la conductividad de la muestra de agua, se determinan todos los diferentes componentes de la incertidumbre en la conductividad. Y luego se aplica la ecuación 21.



$$U_{CE_X} = \sqrt{\sum (U_i)^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

La siguiente tabla reporta los datos para el cálculo de la incertidumbre de muestra de agua

Tabla 25

Cálculo de la incertidumbre en la medición de Conductividad de la muestra de agua

Fuente	Formula	Incertidumbre
Resolución $a = \pm 0.01$	$U_R = \frac{a}{2\sqrt{3}}$	0.00288675
Precisión $a = 0.01$	$U_r = \frac{a}{1.96}$	0.00510204
Deriva $L = 0.03$	$U_D = \frac{L}{\sqrt{3}}$	0.01732051
Desviación estándar de repetibilidad (Sr)	$U_{dsr} = \frac{S_r}{\sqrt{n}}$	0.00634497

Sustituyendo los valores de esta tabla en la ecuación 21 obtenemos:

$$U_{CE_X} = \sqrt{\sum (U_i)^2} = \sqrt{(0.00288675)^2 + (0.00510204)^2 + (0.01732051)^2 + (0.00634497)^2}$$

$$U_{CE_X} = 0.01935518$$

5.5.2. Balance de incertidumbres del proceso de medición de conductividad eléctrica en la muestra de agua

Para el balance de incertidumbres se toman en cuenta todos los parámetros asociados a la medición de la conductividad eléctrica en la muestra de agua, y para una mayor precisión, los cálculos se realizaron con el programa de cálculo formal MAPLE 18™.

En la tabla 26, se muestran las variables que intervienen en el modelo matemático de la ecuación (2), sus valores, sus coeficientes de sensibilidad (ci) y sus respectivas incertidumbres (μ_i); calculados a partir de la derivada parcial con el promedio de los promedios de la conductividad eléctrica corregida de la muestra, CE_{corr} .

$$CE_{corr} = \frac{CE_{Tx}}{1 + 0.02(T_X - T_{ref})}$$



$$CE_{corr} = \frac{CE_T}{1 + 0.02(T_X - T_{ref})} = \frac{326.91}{(1 + (0.02 * 30) - (0.02 * 25))} = 297.190909$$

$$cCE_T = \frac{\partial CE_{corr}}{\partial CE_{T_X}} = \frac{1}{1 + 0.02T_X - 0.02T_{ref}} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$cCE_T = \frac{\partial CE_{corr}}{\partial CE_{T_X}} = \frac{1}{1 + 0.02T_X - 0.02T_{ref}} = \frac{1}{(1 + (0.02 * 30) - (0.02 * 25))} \\ = 0.90909091$$

$$cT = \frac{\partial CE_{corr}}{\partial T_X} = - \frac{0.02CE_T}{(1 + 0.02T_X - 0.02T_{ref})^2} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$cT = \frac{\partial CE_{corr}}{\partial T_X} = - \frac{0.02CE_T}{(1 + 0.02T_X - 0.02T_{ref})^2} = - \frac{0.02 * 326.91}{(1 + (0.02 * 30) - (0.02 * 25))^2} \\ = -5.40347107$$

$$cT_{ref} = \frac{\partial CE_{corr}}{\partial T_{ref}} = \frac{0.02CE_T}{(1 + 0.02T - 0.02T_{ref})^2} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$cT_{ref} = \frac{\partial CE_{corr}}{\partial T_{ref}} = \frac{0.02CE_T}{(1 + 0.02T - 0.02T_{ref})^2} = \frac{0.02 * 326.91}{(1 + (0.02 * 30) - (0.02 * 25))^2} \\ = 5.40347107$$

El índice de contribución, Ind% que se determina para establecer cuál de todas las variables influye más al valor de incertidumbre en la medición de conductividad de la muestra, se calcula a partir de la ecuación 25.

$$Ind\% = \frac{(Ci\mu i)^2}{\sum (Ci\mu i)^2} * 100 \quad \text{Ecuación 25}$$

Tabla 26

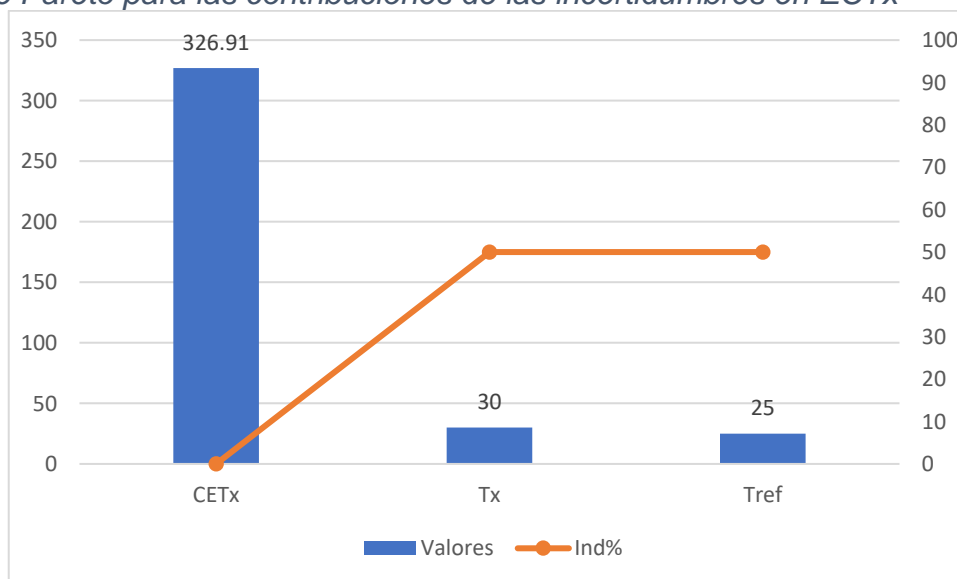
Balance de la incertidumbre en la medición de conductividad eléctrica en una muestra de agua.

Parámetro	Valor	C_i	μ_i	$(C_i \mu_i)^2$	Ind%
CE_{Tx}	326.91	0.90909091	0.019355	0.00031	0.013253
T_x	30	-5.40347107	0.2	1.1679	49.99337
T_{ref}	25	5.40347107	0.2	1.1679	49.99337
suma				2.33611	100

La figura 16 representa el Diagrama de Pareto, donde se puede apreciar que los parámetros temperatura ambiente a la que fue medida la muestra (T_x y la temperatura de referencia (T_{ref}) son las que mayormente contribuyen, con casi el 50%, a la incertidumbre en la medición de la conductividad de la muestra de agua.

Figura 16

Diagrama de Pareto para las contribuciones de las incertidumbres en ECT_x



5.6. Estimación de la incertidumbre combinada en la medición de conductividad eléctrica en la muestra de agua CE_{Tx}

Al aplicar la ley de propagación del error para estimar la incertidumbre combinada de la medición de la conductividad eléctrica en la muestra de agua, teniendo en cuenta que en el



modelo matemático no intervienen parámetros de regresión de un modelo de calibración lineal (intercepto y pendiente), la ecuación (3) se simplifica a la ecuación 26.

A continuación, la tabla 27 presenta los datos de las incertidumbres de las fuentes que intervienen en la estimación de la incertidumbre combinada de la medición de conductividad eléctrica en la muestra de agua CETx.

Tabla 27

Valores de incertidumbres en la medición de conductividad eléctrica en la muestra de agua CETx.

Fuente	Incertidumbres	
Balanza	$U_B = \sqrt{\left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + 2\left(\frac{L}{\sqrt{3}}\right)^2}$	0.000866146
Matraz	$U_V = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{6}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{V\alpha\Delta T}{2\sqrt{3}}\right)^2}$	0.032661154
Masa, KCl	$U_{m,kcl}$ $= \sqrt{(C_M)^2(U_M)^2 + (C_V)^2(U_V)^2 + (C_{pf})^2(U_{Pf})^2 + (C_P)^2(U_P)^2}$	0.283945624
LabQyuest1	$U_{LQ1} = \sqrt{\left(\frac{a}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{S_r}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{L}{\sqrt{3}}\right)^2}$	0.01767337

$$U_{CETx} = \sqrt{\sum(C_i U_i)^2} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$U_{CEX} = \sqrt{(C_b U_b)^2 + (C_v U_v)^2 + (C_{m,Kcl} U_{m,Kcl})^2 + (C_{labQ} U_{labQ})^2}$$

$$U_{CEX}$$

$$= \sqrt{(1 * 0.000866146)^2 + (1 * 0.032661154)^2 + (1 * 0.283945624)^2 + (1 * 0.01767337)^2}$$

$$U_{CEX} = \mathbf{0.28636509}$$

Para estimar la incertidumbre expandida, es necesario seleccionar un valor de factor de cobertura **k**, que comúnmente se selecciona de acuerdo al tipo de distribución de probabilidad y un nivel de confianza establecido. A continuación, la tabla 28 muestra algunos valores de factor de cobertura para diferentes distribuciones y niveles de confianza.



Tabla 28

Valores de factor de cobertura, nivel de confianza y tipos de distribución de probabilidad

K	Nivel de confianza	Tipo de distribución
2	95.45%	Normal
1.96	95%	Normal
$t_{0.975, v}$	95%	Student, 2 colas

En base a la tabla 28, tomamos el valor de factor de cobertura $k = 1.96$ asumiendo que los resultados siguen una distribución normal al 95% de nivel de confianza.

$$U_{exp} = U_{CE_X} * \kappa \quad \text{Ecuación 27}$$

$$U_{exp} = 0.28636509 * 1.96 = 0.561275576$$

El intervalo de confianza de la conductividad medida en la muestra de agua es:

$$CE_{corr} \pm U_{exp} = 297.19 \pm 0.56$$



6. CONCLUSIONES

- El estudio empleando la metodología de la guía ISO GUM 2008, facilitó la identificación de las principales fuentes de incertidumbre que intervienen en el proceso de medición de la conductividad eléctrica con ayuda de un diagrama causa-efecto.
- Se adaptó un modelo matemático a partir del modelo matemático establecido por el fabricante, que se adecuó al proceso de medición bajo nuestras condiciones de trabajo.
- A partir del modelo matemático obtenido se determinaron los coeficientes de sensibilidad empleando el software de modelización matemática MAPLE 18™. Y en base al balance de incertidumbres y el diagrama de Pareto, el factor que más influye en la medida de la conductividad es la temperatura, en hasta casi un 50%, tanto para la temperatura del ambiente como para la de referencia.
- Finalmente, para la incertidumbre expandida sin intervención de parámetros de regresión en el modelo de calibración lineal, se estableció un factor de cobertura a un nivel de significancia del 95% dando como resultado 0.56. Cuyo resultado final de conductividad eléctrica corregida de la muestra sería 297.19 ± 0.56 .



7. RECOMENDACIONES

- Realizar este estudio con conductímetros de mesa y/o portátiles para validar resultados obtenidos con la interfast1 de vernier.
- Emplear estándares de referencia con valores de conductividad de 1413 (μS) y 12.88 mS vigentes.
- Aplicar prueba de robustez a los nuevos estudios para considerar nuevas fuentes de incertidumbre.



8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AOAC. (1973). *Official Method 973.40 Specific Conductance of Water* . Madrid .
- Barrera, G. R. (2020, mayo 22). *Slideshare*. Retrieved from Slideshare a scribd company: <https://es.slideshare.net/slideshow/conductividad-234469815/234469815>
- Benitez Sebastian Castaño, &. U. (2018). Calculo de la incertidumbre en la medición para los ensayos de alcalinidad, conductividad y nitritos por fotometría visible de acuerdo a la GTC 51 . *Revista academica de Colombia*, 82-89.
- Bettencourt da Silva, A. W. (2015). Establecimiento y empleo de la incertidumbre objetivo en la medición química. *Eurachem/CITAC Guide: Setting and Using Target Uncertainty in Chemical Measuremen 1ra ed.* , 60-65.
- BIPM, I. I. (1995). Evaluation of measurement data - Guide for to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), ISO.
- BIPM, I. I. (2008). Evaluation of measurement data - Guide for to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM), ISO.
- Boyd, C. E. (2017). *Global Seafood Alliance* . Retrieved from <https://www.globalseafood.org/advocate/conductividad-electrica-del-agua-parte-2/>
- Catalán Lafuente, J. (1990). *Química del agua* . Madrid: Bellisco.
- Cisne Altamirano, J. (2001). Validación y evaluación de la incertidumbre en la determinación de hierro en aguas naturales. *Universitas*.
- Cisne, J. (n.d.). Validación y evaluación de la incertidumbre en la determinación de Na, K, Ca, y Mg por Espectrofotometría de emisión y absorción atómica en muestras geotermicas y aplicación de geotermómetros para estimar la temperatura del reservorio. *Validación y evaluación de la incertidumbre en la determinación de Na, K, Ca, y Mg por Espectrofotometría de emisión y absorción atómica en muestras geotermicas y aplicación de geotermómetros para estimar la temperatura del reservorio*. UNAN León, Leon.
- Delgado, G., & Nagel, B. (2008). Un experimento sencillopara evaluar la incertidumbre siguiendo la guis ISO GUM 1995 y utilizando el cálculo simbólico MAPLE 11.0. *Universitas*, 1(2), 19-26.
- Delgado, G., Vanegas, M., & Delgado, M. (2008). Metrología química II: Estimación de la incertidumbre en la medición de pH en aguas. *Universitas*, 1(2), 8-18.
- Delgado, M. V. (2008). Metrología Química II: Estimación de la incertidumbre en la medición de pH en aguas. . *Universitas (León): Revista Científica de la UNAN León*, 2(1), 8-18.
- Espinoza Lloréns, M. (2009). Resultados en la estimación de la incertidumbre de la medición en ensayo de aguas residuales. *Revista Cubana de Química XXI*, 58-67.
- Fuente, C. G. (2013). Parámetros fisicoquimicos del agua . *PV ALBÉITAR*, 1-4.
- García, A. M. (2017). *Ayuntamiento de Ponferrada Concejalía de Medio ambiente*.
- García, M. M. (2012). Estimación de la incertidumbre en la determinación de Dureza total según la guia GTC 51 . *Scientia et Technica*, 2(50), 164-168.



- George Lazar, Claudio Campureanu; Ioan Cirneanu, Danut Vaireanu. (2017, Mayo 12). Good practices in evaluation the uncertainty of measurements for the conductivity of the electrolyte solutions. Bucharest, Rumania.
- Hernández, M. M. (2012). Estimación de incertidumbre Guía GUM. *Revista Española de metrología* , 4-18.
- Herrera, J. (2020). Validación y estimación de incertidumbre de un método analítico para cuantificar hierro total por el método colorimétrico de la fenantrolina en agua potable y natural . *Revista Científica-Estefí: Medio ambiente, Tecnología y desarrollo humano*, 34, 154-168.
- Lenntech. (1993). *Lenntech*. Retrieved from <file:///C:/Users/hP/Zotero/storage/56AGXCN8/conductividad-agua.html>
- Muñoz, C. (1981). *Métodos Eléctricos* (Primera ed.). México: LIMUSA.
- Muñoz, M. P. (2016). *Programa de Metrología* . Retrieved from <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/10142/PROCEDIMIENTO%20PARA%20LA%20CALIBRACION%20DE%20BALANZAS%20ANALITICAS%20EN%20EL%20LABORATORIO%20DE%20QUIMICA%20DE%20LA%20SEDE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Organization, I. S. (2008). Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, ISO GUM 2008. *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida, ISO GUM 2008*. International Standard Organization, España.
- Ramirez, A. (2015, Septiembre 13). *Scribd*. Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/280555548/Informe-Calibracion-Material-Volumetrico>
- Rodier, J. (1990). *Análisis de las aguas: Aguas naturales, Aguas residuales, Aguas de mar*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Rubio Arias, H. O. (2014). Índice de la calidad del agua (ICA) en la presa de Boquilla en Chihuahua, México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 139-150.
- Sartorius. (1994, 01). Manual de uso. Alemania, Alemania, Alemania: Grupo Sartorius.
- Service, N. T. (1969). *Mineral and Physical Analyses* . Springfield, USA: Port Royal Rd.,
- Service, N. T. (1983). *Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes*. Springfield, USA: Port Royal Rd.
- Solís-Castro, Y. Z.-Z.-A. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista tecnologica en Marcha*, 31-35. Retrieved from <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- UNAM. (2009). <https://amyd.quimica.unam.mx>. Retrieved from https://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/3566/mod_resource/content/1/CALIBRACION%20MATERIAL%20VOLUMÉTRICO%20Manual%202.pdf
- Uribe, J. A. (2011). Desarrollo de una metodología para la estimación de la incertidumbre de medición en experimentos de Física. . 291.
- AGUAS CONTINENTALES: Qué son, Características e Importancia*. (s. f.).
- ecologiaverde.com. Recuperado 5 de febrero de 2024, de <https://www.ecologiaverde.com/aguas-continentales-que-son-caracteristicas-e-importancia-2363.html>



- Arderiu, X. F., & Manrique, M. S. (2002a). *Guía para estimar la incertidumbre de medida en ciencias de laboratorio clínico*.
- Arderiu, X. F., & Manrique, M. S. (2002b). *Guía para estimar la incertidumbre de medida en ciencias de laboratorio clínico*.
- Benitez, S. C., & Urueña, S. V. (2018). *CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN PARA LOS ENSAYOS DE ALCALINIDAD, CONDUCTIVIDAD Y NITRITOS POR FOTOMETRÍA VISIBLE DE ACUERDO A LA GTC 5. 82*.
- Calibración y verificación de balanzas: Procedimiento para garantizar la precisión de las medidas de masa | PDF | Calibración | Masa*. (s. f.). Scribd. Recuperado 8 de febrero de 2024, de <https://es.scribd.com/document/479034550/CALIBRACION-Y-VERIFICACION-DE-BALANZAS>
- Cisne Altamirano, J. [i e J. I. (2001). *Validación y evaluación de la incertidumbre en la determinación de hierro en aguas naturales* [Thesis].
<http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/handle/123456789/8267>
- Conductimetria de Eliecer Casique—Issuu*. (2015, mayo 8).
<https://issuu.com/eliyecercasique/docs/conductimetria.pptx>
- Delgado, M., Vanegas, M., & Delgado, G. (2008). Metrología Química II: Estimación de la Incertidumbre en la Medición de pH en Aguas. *Universitas (León): Revista Científica de la UNAN León*, 2(1), Art. 1. <https://doi.org/10.5377/universitas.v2i1.1638>
- García, M. M., Navarrete, C. H. M., & Cabiche, R. X. M. (2012). Estimación de la Incertidumbre en la determinación de Dureza Total según la guía GTC 51. *Scientia et Technica*, 2(50), 164-168.
- Gum20digital1202010.pdf*. (s. f.). Recuperado 8 de febrero de 2024, de <https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>
- Herrera, J. (2020). Validación y estimación de incertidumbre de un método analítico para cuantificar hierro total por el método colorimétrico de la fenantrolina en agua potable y natural. *Revista Científica de FAREM-Estelí: Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, 34, 154-168.
- iAgua, redaccion. (2019, octubre 17). *¿Cuántos tipos de agua hay?* [Text]. iAgua; iAgua.
<https://www.iagua.es/respuestas/cuantos-tipos-agua-hay>



JCGM - Comité Conjunto de Guías en Metrología. (s. f.). Recuperado 9 de junio de 2022, de <https://www.iso.org/sites/JCGM/JCGM-introduction.htm>

J.L, B. (2022, agosto 18). *¿Qué es la Conductancia Eléctrica? Fórmula y Ejemplos.*

Electrónica Online. <https://electronicaonline.net/electricidad/conductancia-electrica/>

Merino, J. A. (s. f.). *UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.*

Propuesta de validación del proceso de muestreo de agua potable. (s. f.). Recuperado 5 de febrero de 2024, de <https://1library.co/document/yjokekmz-propuesta-validacion-proceso-muestreo-agua-potable.html>

quesignificado. (2023, diciembre 6). *Conductancia Específica: Fundamentos, Función y Utilidades.* QueSignificado.org. <https://quesignificado.org/que-es-la-conductancia-especifica/>

Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>

Uribe, J. A. C., & López, A. G. (s. f.). *DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN EN EXPERIMENTOS DE FÍSICA.* 291.

Valdivielso, A. (2020, agosto 5). *¿Qué es el agua?* [Text]. iAgua; iAgua.

<https://www.iagua.es/respuestas/que-es-agua>