

**UNIVERSIDAD DE
CIENCIAS Y ARTES DE
CHIAPAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA EDUCATIVO DE INGENIERÍA
AMBIENTAL**

INFORME TÉCNICO

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD
MICROBIOLÓGICA DEL AGUA
PURIFICADA DE PLANTAS
RELLENADORAS EN LA ZONA
NORESTE DE TUXTLA GUTIÉRREZ,
CHIAPAS.**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

PRESENTA:

KARLA JUDITH ROBLERO SANTIZO

DIRECTOR:

DR. HUGO ALEJANDRO NÁJERA AGUILAR

CODIRECTORA:

**ING. FLOR DE MAGALY GONZÁLEZ
HILERIO**

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA GENERAL

DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES

DEPARTAMENTO DE CERTIFICACIÓN ESCOLAR

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Lugar: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

Fecha: 21 de mayo del 2025

C. Karla Judith Roblero Santizo

Pasante del Programa Educativo de: Ingeniería ambiental

Realizado el análisis y revisión correspondiente a su trabajo recepcional denominado:

Evaluación de la calidad microbiológica del agua purificada de plantas rellenadoras en la zona noreste de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

En la modalidad de: Informe técnico

Nos permitimos hacer de su conocimiento que esta Comisión Revisora considera que dicho documento reúne los requisitos y méritos necesarios para que proceda a la impresión correspondiente, y de esta manera se encuentre en condiciones de proceder con el trámite que le permita sustentar su Examen Profesional.

ATENTAMENTE

Revisores

Mtro. José Luis Orantes Gómez

Ing. Flor de Magaly González Hilerio

Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar

Firmas:

Ccp. Expediente



Agradecimientos

A Dios, por iluminar mi camino y darme la fuerza para llegar hasta aquí, incluso en los momentos más difíciles.

Con todo mi amor y gratitud, a mis padres, Gustavo Roblero Pérez y Elizabeth Santizo Ángel quienes, con sacrificios, consejos y un amor infinito han sido el pilar más grande de mi vida. Gracias por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo y humildad. A mis hermanas y familia, que con su cariño y palabras de aliento me acompañaron siempre, aun en la distancia.

A mis asesores, la Ing. Flor de Magaly González Hilerio y el Dr. Hugo Alejandro Nájera Aguilar, por el valioso tiempo dedicado a la revisión y seguimiento de este trabajo. Su orientación académica, junto con su compromiso y profesionalismo, fueron fundamentales para enriquecer este trabajo. Les agradezco profundamente no solo por compartir sus conocimientos y experiencia, sino también por su paciencia y disposición en cada etapa del proceso. Gracias por inspirarme a ser mejor cada día

A los amigos que estuvieron a mi lado en este proceso, por las risas, el apoyo sincero y por recordarme que nunca estuve sola en esta etapa. A todas las personas que hicieron posible este proyecto, mi más sincero agradecimiento, porque cada gesto, cada palabra y cada ayuda se convirtió en una pieza esencial para lograr esta meta.

Índice

1. Introducción.....	8
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2 Justificación	11
1.3. Antecedentes	12
1.4 Objetivos.....	16
1.4.1 Objetivo general	16
1.4.2 Objetivos específicos	16
2. Marco teórico	16
2.1 Calidad del agua	16
2.2 Contaminación microbiológica del agua.....	18
2.3 Microorganismos indicadores de calidad del agua.....	20
2.3.1 Coliformes Totales	20
2.3.2 Coliformes Fecales.....	21
2.3.3 <i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>)	21
2.3.4 Virus	22
2.3.5 Parásitos	22
2.4 Técnicas de tratamiento microbiológico del agua.....	23
2.5 Control de la calidad del agua potable.....	26
2.5.1 Vigilancia de la calidad del agua.....	27

2.6 Métodos de análisis microbiológicos en aguas para consumo humano	28
2.6.1 Método de filtración por membrana	29
2.7. Normatividad aplicable	30
3. Materiales y Métodos	32
3.2 Muestreo.....	34
3.2.1 Recolección de la muestra	34
3.3 Equipo y material de laboratorio	35
3.3.1 Medio de cultivo	36
3.3.2 Análisis microbiológico	37
4. Resultados y Análisis.....	39
5. Análisis estadístico de los muestreos	42
6. Discusión de resultados	44
7. Conclusiones	46
8. Recomendaciones	47
9. Referencias.....	48
10. Anexo A. Fotografías	53
11. Anexo B	55

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación de las plantas purificadoras muestreadas en la zona noreste de Tuxtla, Gtz.	33
Figura 2. Recolección de las muestras.	35
Figura 3. Proceso de filtración de muestras.	37
Figura 4. Proceso de incubación.	38
Figura 5. Conteo de colonias confirmadas.	39
Figura 6. Resultados obtenidos de coliformes totales para los muestreos: M-1 (28-jun-2023), M-2 (26-sept-2023) y M-3 (05-dic.2023).	40
Figura 7. Resultados obtenidos de coliformes fecales para los muestreos: M-1 (28-jun-2023), M-2 (26-sept-2023) y M-3 (05-dic.2023).	41

Índice de tablas

Tabla 1. Agentes patógenos transmitidos por el agua.	19
Tabla 2. Reducciones de la carga de bacterias, virus y protozoos logradas mediante tratamientos del agua; típicos y mejorados.	24
Tabla 3. Normatividad aplicable en calidad de agua para consumo humano.	31
Tabla 4. Equipo y material de laboratorio para análisis microbiológico.	35
Tabla 5. Información biológica del medio de cultivo.....	36
Tabla 6. Resultados de concentración de coliformes totales (UFC/100 mL) por muestreo y comparaciones estadísticas según la prueba de Tukey.....	42
Tabla 7. Resultados de concentración de coliformes fecales (UFC/100 mL) por muestreo y comparaciones estadísticas según la prueba de Tukey.....	43

1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

El agua es un componente vital en todo el planeta, es por ello que, en el artículo 4 constitucional, párrafo 6, se reconoce el derecho humano al agua: “Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines” (IMTA, 2019).

En el último siglo, la demanda de agua a nivel mundial ha aumentado debido a la alta tasa de crecimiento demográfico, la rápida urbanización, el desarrollo económico y las modalidades cambiantes de consumo, es por ello que en el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 6), formulado por el grupo de trabajo abierto de las Naciones Unidas, plantea una misión viable, para los dos próximos decenios: “Garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos”.

El objetivo del ODS 6 puede alcanzarse mediante la aplicación de cuatro principios: 1) separar el agua potable de las aguas residuales; 2) facilitar el acceso al agua potable y tratarla para eliminar contaminantes químicos y biológicos; 3) proteger y recuperar los ecosistemas de agua dulce; y 4) salvaguardar el acceso al agua y el derecho al uso del agua. Con estas acciones, se busca lograr un acceso universal y equitativo al agua potable, así como a servicios de saneamiento e higiene adecuados, y mejorar la calidad del agua a nivel global (ODS 6 Agua limpia y saneamiento | Pacto Mundial ONU, 2023).

Por otro lado, de acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en México se reconoce al agua como un asunto estratégico y de seguridad nacional, al día de hoy, se ha convertido en un elemento central de la política ambiental, y más aún, en un factor clave de la política de desarrollo social y de la política económica; su disponibilidad condiciona la

posibilidad de desarrollo de algunas regiones del país y su calidad es factor determinante para la salud y bienestar de la población (CONAGUA, 2006).

¿Por qué es importante consumir agua en buenas condiciones? La CONAGUA dice de manera general que el agua para consumo proviene de dos fuentes, la pública y la privada. En el primer caso, llega a través del agua entubada proveniente de acuíferos superficiales y las aguas profundas; sin embargo, esta no es confiable para la ingesta directa; para el segundo caso, el agua privada representa hoy entre 75 y 80% del consumo en el hogar, esta llega en mayor medida a través de agua embotellada, la cual tiene dos orígenes; las grandes embotelladoras que de alguna manera procuran la verificación y la certificación, y las plantas rellenadoras, las cuales son establecimientos que se dedican al llenado y envasado de agua para consumo humano, conocidos comúnmente como plantas purificadoras.

De acuerdo con Añorve (2020), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) contabilizaba en el país 24,061 establecimientos purificadores de agua, coloquialmente conocidos como “rellenadoras” y se calcula que el 70% de las “rellenadoras” no cumple con los estándares de calidad para garantizar que el agua no esté contaminada con bacterias y materias fecales. De acuerdo con lo anterior, estos datos son una importante demostración de la calidad del agua que se comercializa en el país.

No obstante, el no tener un manual básico de procedimientos y carecer de buenas prácticas para la potabilización del agua, influye en la calidad óptima que debe tener el agua para consumo humano de acuerdo a la norma NOM-127-SSA1-2021, puesto que, Meza (2010), menciona que pueden existir peligros de contaminación debido a la falta de control de las sustancias utilizadas para la desinfección del agua, objetos extraños en el interior debido a un mal lavado de garrafones, así como problemas en el envasado que permite la proliferación de microorganismos de riesgo para la salud pública.

En el estado de Chiapas, diversos análisis realizados en agua purificada distribuida en distintos municipios han evidenciado la presencia de microorganismos indicadores de contaminación microbiológica, lo que representa un riesgo potencial para la salud de los consumidores. Estos hallazgos ponen de manifiesto que, aun cuando el agua ha pasado por procesos de purificación,

puede sufrir contaminación debido a deficiencias en las etapas de tratamiento, almacenamiento o distribución.

Bajo este contexto, y considerando la creciente dependencia de la población de Tuxtla Gutiérrez hacia el consumo de agua proveniente de plantas rellenadoras, se vuelve prioritario enfocar los esfuerzos de investigación en este tipo de establecimientos. Evaluar su producto no solo permite conocer si cumplen con la normatividad vigente, sino también identificar puntos críticos en sus procesos que puedan favorecer la presencia de microorganismos patógenos.

Por ello, en el presente estudio se planteó determinar la calidad microbiológica del agua purificada comercializada por plantas rellenadoras de la zona noreste de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Para tal fin, se analizaron muestras provenientes de tres establecimientos seleccionados estratégicamente por su ubicación y representatividad en la zona. El análisis se llevó a cabo siguiendo lo establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-102-SCFI-2006 y su actualización PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018, tituladas Calidad del agua – Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – Método de filtración en membrana, las cuales describen de manera detallada el procedimiento para la recolección, filtración, incubación y conteo de colonias bacterianas.

1.2 Justificación

A nivel mundial, alrededor de 1,8 millones de personas mueren cada año debido a enfermedades diarreicas (incluido el cólera); un 90% de esas personas son niños menores de cinco años, principalmente procedentes de países en desarrollo. Además, se ha estimado que el 88% de las enfermedades diarreicas son producto de un abastecimiento de agua insalubre y de un saneamiento y una higiene deficiente (OMS, 2007).

La contaminación microbiológica es responsable de más del 90% de las intoxicaciones y transmisión de enfermedades por el agua. Los principales microorganismos que se transmiten a través del agua engloban a las bacterias (*Escherichia coli*, *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Vibrio cholerae*, *Yersinia enterocolitica*, *Campylobacter jejuni*), virus (*Enterovirus*, *rotavirus*, *adenovirus*), protozoos (*Giardia lamblia*, *Cryptosporidium parvum*, *Entamoeba histolytica*) y helmintos (*Ascaris lumbricoides*) (FAO, 2003), es por ello que la problemática de acceso a fuentes de agua con la calidad y disponibilidad adecuada para abastecimiento humano es un tema de vital importancia tanto para las autoridades como para la sociedad en general.

Para las autoridades del estado de Chiapas, el establecimiento de suministros de agua adecuados, higiénicos y seguros son de gran importancia, sin embargo, las fuentes de agua se han contaminado debido al aumento de la actividad industrial, agrícola y al desarrollo urbano que han tenido sus ciudades importantes (Graniel & Carrillo, 2006). De acuerdo con diversos estudios sobre la calidad de agua que venden las “rellenadoras”, en el estado de Chiapas, entre el 65 y el 70% del agua que venden dichos establecimientos está contaminada con bacterias, y hasta un 50% de esta agua puede contener bacterias de materia fecal, como *Escherichia coli* (*E. coli*) (Añorve, 2020).

En este sentido, el consumo de agua purificada es una necesidad fundamental para la salud de la población, por lo que es importante garantizar que el agua cumpla con estándares microbiológicos, físicos y químicos. El monitoreo continuo permite detectar y corregir problemas a tiempo, fortaleciendo la seguridad hídrica y la confianza en el suministro.

Por lo anterior, en el presente estudio se evaluó la calidad microbiológica del agua purificada, comercializada en plantas rellenadoras de la zona noreste de Tuxtla Gutiérrez, que sirva de evidencia para impulsar medidas de prevención, correctivas y regulaciones más estrictas para las plantas rellenadoras de agua de la región.

1.3. Antecedentes

La calidad del agua en plantas rellenadoras ha sido objeto de diversos estudios debido a su impacto en la salud pública. Investigaciones previas han evaluado los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua purificada en distintas regiones del mundo, encontrando que, en algunos casos, las plantas no cumplen con las normativas establecidas, debido a que se han reportado la presencia de microorganismos indicadores de contaminación, como coliformes totales y *E. coli*, en muestras de agua para el consumo humano, lo que puede representar un riesgo para los consumidores. En este apartado se mencionan algunos estudios desde el ámbito mundial hasta los más cercanos en lo regional.

Dentro de los trabajos encontrados para otros países, se tiene el de Mejía *et al.*, (2021), quienes realizaron un análisis microbiológico del agua para consumo humano de la población del Centro Poblado Pachapiriana, Perú, para determinar el nivel de contaminación microbiológica del agua de consumo humano. En la investigación se trabajó con la Técnica del Número Más Probable (NMP) en donde las muestras de agua tienen que ser $< 1,8/100$ mL para considerarse de buena calidad; mientras que los resultados obtenidos fueron $> 6.8/100$ mL, elevado para coliformes totales; para coliformes fecales dio como resultado $> 4/100$ mL, las muestras restantes tuvieron presencia de *E.coli*. Con base a la prueba presuntiva, confirmativa y completa realizadas, se determinó que el agua que abastece a Pachapiriana, no reúne las condiciones microbiológicas para ser considerada apta para el consumo humano debido a que todas las muestras presentan un NMP importante de coliformes fecales, totales y *E.coli*, lo que indica que el agua está contaminada con materia fecal.

Otro estudio es el de Benítez *et al.*, (2013), quienes realizaron un análisis para evaluar la calidad microbiológica del agua envasada en bolsas y botellas que se venden en la ciudad de Maracaibo del Estado Zulia, Venezuela. El análisis microbiológico se realizó de acuerdo a normas

COVENIN, mediante el método del Número más Probable (NMP), para determinar coliformes totales, coliformes fecales, aerobios mesófilos y *Pseudomonas aeruginosa*. Los valores de NMP para coliformes totales estuvieron entre 9,2 y < 2,2, coliformes fecales entre 5,1 y < 2,2 NMP y para *Pseudomonas*, la muestra que mostró el valor más alto fue de NMP de 28 por lo que solo 2 marcas de la analizadas cumplieron con todos los requisitos microbiológicos, siendo éstas aptas para consumo humano.

Un estudio más es el reportado por Zamberlan *et al.*, (2008), quienes realizaron una investigación en la ciudad de Maringá, Estado de Paraná, Brasil, en el cual estudiaron comparativamente la calidad bacteriológica del agua del grifo del suministro municipal de agua, botellas de 20 litros de agua mineral de dispensadores de agua y muestras tomadas de botellas nuevas de 20 litros de agua mineral. Los resultados mostraron que, el 36,4% de las muestras de agua del grifo de los sistemas de agua municipales y el 76,6% de las botellas de 20 litros de agua mineral de los dispensadores de agua estaban contaminadas por al menos una bacteria coliforme o indicadora y/o al menos una bacteria patógena, resultando en la necesidad de integrar un sistema de vigilancia mejorado para la industria del agua embotellada.

Noriega & Martínez (2017) realizaron una investigación con el fin de evaluar la calidad del agua para consumo humano en el corregimiento de la Peña Atlántico, Colombia y determinar el riesgo potencial para la salud humana, para ello se realizaron 3 campañas de muestreo del agua de dicho lugar, posterior a la toma de muestras se realizaron los respectivos análisis de laboratorio a las muestras para obtener los resultados que indican la calidad de agua y posteriormente identificar el riesgo potencial al cual están expuestos habitantes mediante el cálculo del IRCA (Índice de riesgo de calidad de agua). Se obtuvo que, la calidad del agua se ve afectada por contaminación biológica con coliformes totales y coliformes fecales y por parámetros por fuera del nivel permisible como la alcalinidad y oxígeno disuelto según los rangos establecidos por la normatividad, concluyendo que el agua del corregimiento no es apta para el consumo humano porque representa un nivel de riesgo alto.

Oblitas & Torres (2016) realizaron un trabajo de investigación en el cual se buscaba identificar coliformes totales, coliformes fecales y *E. coli* en el agua potable del distrito de Cajamarca, en

Perú. Se tomó una muestra representativa de 500 mL del agua potable de la salida del reservorio de cada planta de tratamiento y de cada junta administradora de servicios y saneamiento “Jass” en un frasco de vidrio estéril, siendo transportadas al Laboratorio de la Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental. El método que se utilizó fue el filtro por membrana de Nitrato de Celulosa 0,45 μm en el equipo de filtración. Los resultados fueron analizados a través de los programas estadísticos ANOVA y T-Student para la respectiva comparación. De acuerdo con los resultados se obtuvieron que existe la presencia de coliformes totales, coliformes fecales y *E. coli* en las Jass en comparación a las plantas de tratamiento que no se encontraron ningún tipo de bacterias estudiadas.

Para estudios reportados en el ámbito nacional, se encuentra el de Alcántara & Cázares (2014), donde se realizó un análisis para determinar la calidad microbiológica del agua de Ciudad Nezahualcóyotl con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1- 1994 para conocer la condición de agua que llega a los domicilios, se empleó el procedimiento del NMP como lo indica dicha norma. Se obtuvieron 45 muestras de agua potable, se determinó el NMP mediante las pruebas: presuntiva, confirmativa y completa, de microorganismos coliformes totales, coliformes fecales y *E. coli*. Las muestras analizadas alcanzaron $\geq 1/100$ NMP/100 mL de organismos coliformes totales, esto indica que el agua que llega a los domicilios de Ciudad Nezahualcóyotl no reúne la calidad microbiológica requerida para considerarse como potable.

Otro trabajo es el reportado por Becerra *et al.*, (2019), quienes llevaron a cabo un estudio en la ciudad de Morelia, Michoacán, con la finalidad de medir la calidad microbiológica de diferentes establecimientos dedicados a la purificación de agua para el consumo humano. Ellos encontraron que, de las muestras recolectadas, 30% de estas dieron positivo a *E. coli*. Por su lado, 65 % de las muestras excedió las 100 UFC/mL, de bacterias mesófilas permitidas por las NOM-210-SSA1-2014. Por lo cual, los autores reportan que el proceso de purificación de agua en garrafones para el consumo humano en estas empresas se lleva a cabo de manera ineficiente a pesar de la implementación de metodologías muy diversas como la osmosis inversa, filtros de carbón activado, desinfecciones químicas entre otras técnicas que suelen anunciarse como publicidad de las empresas. Sugiriendo que tales empresas deberían realizar la validación correspondiente a de sus métodos de purificación para garantizar la inocuidad de su producto.

Un estudio más es el reportado para la ciudad de Puebla, donde Cepeda *et al.*, (2022) realizaron un trabajo de investigación para examinar la calidad microbiológica del agua proveniente de pequeñas plantas purificadoras, así como, determinar la existencia de bacterias *Aeromonas sp* y *Pseudomonas sp*, y caracterizar si presentan un fenotipo patógeno oportunista. Se comprobaron los géneros microbianos mediante análisis bioquímico. El 40% de las plantas purificadoras no cumplieron con la calidad microbiológica del agua para consumo humano. El 41.4 % de los garrafones de agua muestreados incumplió la normativa, presentando coliformes totales 35.7 %, *Pseudomonas* 30 % y bacterias coliformes fecales el 5.7 %.

Con respecto a estudios realizados en el estado de Chiapas, se tiene por ejemplo el reportado por Magdaleno *et al.*, (2019), quienes analizaron a las microempresas de purificación de agua en la costa del estado, para determinar la calidad bacteriológica de las plantas purificadoras e identificar los potenciales riesgos de contaminación recurrente. Obtuvieron que el 79% del total de las muestras de agua fueron positivo para bacterias mesofílicas aerobias y 25% dio positivas para coliformes totales. Se realizaron preguntas a los manipuladores y/o dueño, y el 72% no utiliza la higienización de las tuberías, el 100% utiliza tuberías de PVC, el 79% no higieniza las boquillas, el 41% no usa tapabocas y el 55% no usa cofias, el 100% no tiene manual de buenas prácticas de manufactura, el 55% no tiene el documento del curso de manejo higiénico de alimentos de la COFEPRIS. Estos resultados nos presentan una insatisfactoria calidad microbiológica derivado de falta de tratamiento de higienización y buenas prácticas de manufactura.

Un estudio más es el reportado por Cancino (2021), quien evaluó la calidad sanitaria del agua purificada envasada en garrafones, provenientes de purificadoras de agua, situada en el barrio San Ramón de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, para el cual se realizó un análisis microbiológico y fisicoquímico de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994. Se obtuvo que algunos parámetros fisicoquímicos están fuera o inferiores de la norma (pH, turbidez, sólidos disueltos totales), por lo que son significativamente inapropiadas en el producto. Así mismo, se realizó un análisis en donde se percató algunas deficiencias en el proceso del purificación, manejo y manipulación del agua postproceso en esta clase de establecimiento.

Estos hallazgos subrayan la necesidad de fortalecer la regulación y monitoreo de las plantas rellenadoras, así como la implementación de medidas correctivas para garantizar la seguridad microbiológica del agua distribuida para el consumo humano, por lo que es necesario un seguimiento sanitario más estricto para lograr el cumplimiento de las normas nacionales e internacionales relacionadas con el consumo de agua purificada, evitando así el riesgo de afectaciones a la salud de los consumidores.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la calidad microbiológica del agua purificada que se comercializa en la zona noreste de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la presencia de microorganismos fecales y totales contenidos en el agua purificada.
- Determinar el nivel de cumplimiento del agua purificada, en función a su calidad microbiológica de acuerdo a la NOM-127-SSAI-2021.

2. Marco teórico

2.1 Calidad del agua

El agua ha desempeñado un papel central para el desarrollo de diversas civilizaciones. La sociedad se beneficia ampliamente de los servicios ambientales del agua proveniente de acuíferos, ríos, lagos o costas, y por consiguiente el ser humano ejerce una influencia directa o indirecta sobre ellos y su biota acuática (Brown, 2003).

La calidad del agua de consumo humano constituye uno de los problemas más importantes en salud pública. Las enfermedades diarreicas son la segunda mayor causa de muerte de niños

menores de cinco años (525000 niños menores de cinco años cada año). En todo el mundo se producen unos 1700 millones de casos de enfermedades diarreicas infantiles cada año.

El acceso al agua potable y a servicios adecuados de saneamiento e higiene puede prevenir una proporción significativa de las enfermedades diarreicas. Es por ello que las intervenciones destinadas a prevenir las enfermedades diarreicas, en particular el acceso al agua potable, el acceso a buenos sistemas de saneamiento y el lavado de las manos con jabón, permiten reducir el riesgo de enfermedad diarreica (Espigares & Espínola, 2020).

Es importante mencionar que, las exigencias del suministro de agua para consumo humano, no sólo afectan a la cantidad, sino que es necesario que tenga una calidad adecuada. El agua destinada al consumo humano debe reunir dos características fundamentales:

- A. Sin riesgos para la salud: esto significa que debe estar exenta de sustancias o microorganismos que puedan alterar la salud.
- B. Sin efectos adversos: su calidad tiene que ser tal, que no deteriore las instalaciones o cause daños en las infraestructuras.

El agua en la naturaleza no es una sustancia pura, ya que, durante su ciclo, incorpora sustancias del medio ambiente por disolución o arrastre, o por contaminación debida a la actividad antrópica. Una forma de considerar la calidad del agua es diferenciar su contenido en tres grupos:

- Componentes habituales del agua: se incorporan al agua de forma natural y están presentes de forma habitual en distintas concentraciones.
- Componentes de origen antrópico: como consecuencia de la actividad humana, es decir, son contaminantes.
- Microorganismos: aunque en pequeña cantidad, se pueden encontrar microorganismos en el medio hídrico natural, el aumento de éstos o la presencia de patógenos, como consecuencia de acciones antrópicas, alterarán la calidad del agua con enorme riesgo para la salud (Espigares & Espínola, 2020).

2.2 Contaminación microbiológica del agua

El agua potable definida como “adecuada para el consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluida la higiene personal”, es libre de microorganismos causantes de enfermedades. Las posibles consecuencias de la contaminación microbiana para la salud son tales que su control debe ser objetivo primordial y nunca debe comprometerse (OMS, 2011).

La presencia o aumento de bacterias, parásitos, virus y hongos en el agua, surge usualmente por efecto directo o indirecto de cambios en el medio ambiente y en la población, tales como urbanización no controlada, crecimiento industrial, pobreza, ocupación de regiones antes deshabitadas, y la disposición inadecuada de excretas humanas y animales. Los cambios relacionados con las actividades antropogénicas se ven reflejados directamente en el entorno y, por consiguiente, en el recurso hídrico.

Las principales actividades que favorecen la contaminación del agua son las agropecuarias como movilización de animales, cultivos, abonos orgánicos mal procesados y disposición inadecuada de aguas residuales que afectan la calidad microbiológica de las fuentes de agua (Núñez *et al.*, 2009). Aunque la presencia de microorganismos de transmisión hídrica no está limitada a una región específica en el mundo, o a su nivel de desarrollo (OMS, 2004), los problemas de desplazamiento, la respuesta ineficiente de los servicios de salud, la poca inversión de los estados en la garantía de la potabilización del agua para toda la población, la falta de control de brotes y la falta de intervención de los sistemas de salud pública, favorecen la propagación, incidencia, morbilidad y mortalidad asociada a enfermedades relacionadas con el agua de consumo, principalmente en países en vía de desarrollo (Silva *et al.*, 2004).

La falta de garantías en la seguridad del recurso hídrico hace que la comunidad quede expuesta al riesgo de brotes de enfermedades relacionadas con el agua, evitarlos es particularmente importante dado que el agua como vehículo tiene gran potencial de infectar simultáneamente a gran proporción de la población.

Los riesgos para la salud relacionados con el consumo de agua contaminada más comunes son las enfermedades infecciosas ocasionadas por agentes patógenos como bacterias, virus y

parásitos, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Agentes patógenos transmitidos por el agua.

Bacterias	Virus	Protozoarios	Helmintos
<i>Campylobacter jejuni</i>	<i>Adenovirus ssp</i>	<i>Balatidium coli</i>	<i>Tricuris trichuiur a</i>
<i>Escherichia Coli</i>	<i>Enterovirus ssp</i>	<i>Entamobea histolytica</i>	<i>Ancylostoma duodenale</i>
<i>Enteropatógenas</i>	<i>Hepatitis A</i>	<i>Giardia lamblia</i>	<i>Ascaris lumbricoides</i>
<i>Salmonellas sp</i>	<i>Agente Norwalk</i>	<i>Cryptosporidium</i>	<i>Echinococcus granulosus</i>
<i>Shigellas sp</i>	<i>Reovirus</i>		<i>Necator americanus</i>
<i>Vibrio cholerae</i>	<i>Virus Coxsackie</i>		<i>Stroglyoides stercolaris</i>
<i>Yersinia enterocolítica</i>	<i>Rotavirus</i>	<i>Taenia solium</i>	

Fuente: OMS, 2006.

2.3 Microorganismos indicadores de calidad del agua

Los indicadores microbiológicos de calidad del agua son organismos que tienen un comportamiento similar a microorganismos patógenos cuya procedencia, concentración, hábitat y reacción a factores externos, es la de la mayoría. Su presencia determina la existencia de patógenos y permite comparar sus reacciones a cambios de pH y temperatura o aplicación de medios físicos o químicos de desinfección, con la ventaja de ser más fácilmente cultivables o identificables y económicamente factibles (Ríos *et al.*, 2017).

Estos indicadores deben cumplir requerimientos para ser establecidos como tal: estar ausentes en agua no contaminada y mantener una correlación de su presencia con la de los patógenos, en mayor proporción. Deben sobrevivir en el agua más tiempo y ser igual o más resistente a factores externos que los patógenos, sin ser patógenos y no deben reproducirse en animales poiquiloterms. Otra de sus características relevantes es ser de fácil, rápido y económico aislamiento, cuantificación e identificación y en lo posible, tener criterios microbiológicos comunes internacionalmente. Deben hallarse de forma constante en las heces y estar asociados a aguas residuales; estar distribuidos al azar en las muestras y ser resistentes a la inhibición de su crecimiento por otras especies (Vázquez *et al.*, 2006).

A continuación, se describen algunos grupos de microorganismos recomendados en guías y estándares como indicadores de la calidad del agua potable, importantes para su valoración en términos sanitarios.

2.3.1 Coliformes Totales

Son bacterias gram negativas, no formadoras de esporas, oxidasa negativa y con forma de bacilo, que pueden crecer en medio aerobio y anaerobio facultativo en presencia de sales biliares y capaces de fermentar lactosa con producción de ácido y aldehído, para su interpretación se observa el crecimiento de colonias típicas color rosado a rojo con brillo metálico dorado después de una incubación de 48 horas a una temperatura de 36 ± 2 ° C. Los coliformes totales son buenos indicadores microbianos de la calidad del agua (OMS, 2006).

En este sentido, el grupo de bacterias coliformes es el principal indicador de la adecuación del agua para uso doméstico, industriales o de otro tipo. La experiencia ha demostrado que la densidad del grupo de los coliformes es un indicador del grado de contaminación y, por ende, es el principal indicador de higiene de los alimentos.

2.3.2 Coliformes Fecales

Los coliformes fecales también denominados coliformes termotolerantes porque soportan temperaturas de hasta 45°C, se pueden encontrar en el intestino humano y en heces de animales, comprenden un grupo muy reducido de microorganismos los cuales son indicadores de calidad bacteriológica del agua. En su mayoría están representados por el microorganismo *Escherichia coli*, pero se pueden encontrar entre otros menos frecuentes *Citrobacter freundii* y *Klebsiella pneumoniae*, estos últimos hacen parte de los coliformes termotolerantes, pero su origen se asocia generalmente con la vegetación y solo ocasionalmente aparecen en el intestino. Son microorganismos que fermentan la lactosa con producción de gas a $44^{\circ}\text{C} \pm 0.2$ en un periodo de 24 a 48 horas (MILLIPORE, 2005).

2.3.3 *Escherichia coli* (*E. coli*)

E. coli es miembro de la familia *Enterobacteriaceae*, es una bacteria gram negativa, anaerobia facultativa que forma parte del microbiota normal del intestino del ser humano y los animales, se excreta diariamente con las heces. Es una de las especies bacterianas más minuciosamente estudiadas, y no solamente por sus capacidades patogénicas, sino también como sustrato y modelo de investigaciones metabólicas, genéticas, poblacionales y de diversa índole (Andino & Castillo, 2010).

Desde hace tiempo se reconoce que los organismos del grupo coliformes son un buen indicador microbiano de la calidad del agua potable, debido principalmente a que son de fácil detección y se pueden enumerar en el agua. La presencia de *E. coli* en muestras de agua potable, indica la existencia de fallas en la eficacia de tratamiento de aguas, en la integridad del sistema de distribución, y por tanto evidencia de contaminación de diferentes orígenes: suelo, superficies de agua dulce y tracto digestivo (Ríos *et al.*, 2017).

2.3.4 Virus

Los virus están constituidos por ácido nucleico y proteínas. El ácido nucleico es el genoma viral, ubicado en el interior de la partícula, el cual puede ser, ácido desoxirribonucleico (ADN) o ácido ribonucleico (ARN). Generalmente están asociados con un número pequeño de moléculas proteicas que pueden tener actividad enzimática o cumplir alguna función estabilizadora para el plegamiento del ácido nucleico y armado de la partícula viral. La mayoría de los virus asociados con la transmisión por el agua son los virus entéricos, estos se multiplican en el intestino del hombre, son excretados en gran número en las heces de los individuos infectados y pueden sobrevivir en el medio ambiente por largos periodos de tiempo (WHO, 2011).

El poliovirus es considerado un indicador viral entérico. Sin embargo, las cantidades de este virus en ambientes acuáticos son demasiado variables como para ser considerado un buen indicador, lo que ha llevado a la búsqueda de indicadores alternativos que sean rápida y fácilmente detectables. Estos indicadores son los fagos: colífagos somáticos y colífagos F específicos. La propuesta está basada en que los fagos se encuentran abundantemente tanto en agua residual como en agua contaminada, las poblaciones de colífagos son mucho más grandes que las de los enterovirus. Los colífagos no pueden reproducirse fuera del huésped bacteriano, se pueden aislar y contar por métodos sencillos, los resultados se obtienen más rápidamente, se relacionan directamente con su huésped bacteriano específico (*E. coli*) (WHO, 2011).

2.3.5 Parásitos

Los parásitos que son patógenos para el ser humano se clasifican en dos grupos: los protozoos y los helmintos. Los protozoos son organismos unicelulares cuyo ciclo de vida incluye una forma vegetativa (trofozoito) y una forma resistente (quiste). El estado de quiste de estos organismos es relativamente resistente a la inactivación por medio de los sistemas de tratamiento convencional de aguas (Alarcón *et al.*, 2005). Los protozoos más conocidos en las heces humanas son: *Giardia lamblia*, *Entamoeba histolítica* y *Balantidium coli*. En los últimos años, ha ganado gran importancia la contaminación por *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium parvum*, los cuales se consideran patógenos emergentes y la investigación se ha orientado básicamente al estudio de procesos de desinfección que garanticen la eliminación de este tipo de quistes (Robert Pullés, 2014).

Los protozoos pueden causar enfermedades en el ser humano como: giardiasis, criptosporidiosis, malaria, diarrea por flagelados, disentería amebiana, meningoencefalitis amebiana, infecciones diseminadas e infecciones intestinales. Investigaciones recientes indican que *Cryptosporidium* ocupa el tercer lugar en importancia mundial entre todos los enteropatógenos de transmisión hídrica (WHO, 2011).

Ahora bien, los helmintos incluyen los nemátodos, tremátodos y céstodos. El problema principal es el incremento gradual del número de gusanos en el huésped, debido a la continua ingestión de huevos, dado que no se reproducen ni incrementan su número fuera del huésped, es decir, un huevo fecundo ingerido produce un adulto sin multiplicación intermedia aunado a que la respuesta inmune del huésped es deficiente o ausente (Robert Pullés, 2014).

Esta característica favorece su uso como indicador, ya que, en una muestra, la cantidad de helmintos no varía con el tiempo. *Ascaris lumbricoides* se ha sugerido como un buen indicador del comportamiento de los huevos de helmintos. Sus ventajas consisten en que persiste en el medio ambiente por muchos meses, pero no se multiplica, se puede identificar fácilmente y el índice de parasitismo a nivel mundial es elevado, es por ello que, el agua de consumo no debe contener larvas maduras ni huevos fertilizados, ya que un único ejemplar puede ocasionar una infección (Nelson, 2003).

2.4 Técnicas de tratamiento microbiológico del agua

Es fundamental conocer la presencia de agentes patógenos en las aguas de origen, ya que facilita la selección de la fuente de mayor calidad para alimentar el sistema de abastecimiento de agua de consumo y permite determinar los números y concentraciones de agentes patógenos en las aguas de origen y las necesidades de tratamiento del agua para cumplir las metas de protección de la salud establecidas en un Plan Sanitario del Agua (PSA) (OMS, 2006).

En las aguas de calidad muy alta pueden utilizarse la protección del agua de origen y del sistema de distribución como medidas principales de control para el suministro de agua inocua. Sin embargo, lo más frecuente es que sea necesario someter el agua a tratamiento para retirar o

destruir los microorganismos patógenos. En muchos casos es preciso aplicar múltiples etapas de tratamiento, incluidas, por ejemplo, la coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección, esto de acuerdo con la OMS (2006).

La tabla número 2 contiene información resumida sobre los procesos de tratamiento comúnmente aplicados, ya sea de forma independiente o combinados, para reducir la carga microbiana.

Tabla 2. Reducciones de la carga de bacterias, virus y protozoos logradas mediante tratamientos del agua; típicos y mejorados.

Tratamiento	Grupo de microbios entéricos patógenos	Tasa de eliminación de referencia	Tasa de eliminación máxima posible
Pretratamiento			
Prefiltros	Bacterias	50%	Hasta el 95% si se protegen contra los picos de turbidez mediante un filtro dinámico o si se utilizan únicamente cuando están maduros.
	Protozoos	No hay datos, es probable cierto grado de eliminación	La eficacia de eliminación de protozoos probablemente sea equivalente a la de reducción de la turbidez.
Microtamizado (microstraining)	Bacterias, virus y protozoos	Cero	Generalmente eficaz.
Coagulación, floculación, sedimentación			
Clarificación convencional	Bacterias	30%	90% (en función del coagulante, el pH, la temperatura, la alcalinidad y la turbidez).
	Virus	30%	70% (mismos factores).
	Protozoos	Al menos 30%	90% (mismos factores).
Flotación por aire disuelto	Bacterias	No hay datos	99,9% (en función del pH, la dosis de coagulante, el tiempo de floculación y la tasa de recirculación).
	Virus	No hay datos	
	Protozoos	95%	
Filtración			
Filtración lenta en arena	Bacterias	50%	99,5% en condiciones óptimas de maduración, limpieza y relleno y con ausencia de cortocircuitos.

	Virus	20%	99,99% en condiciones óptimas de maduración, limpieza y relleno y con ausencia de cortocircuitos.
	Protozoos	50%	99% en condiciones óptimas de maduración, limpieza y relleno y con ausencia de cortocircuitos.
Filtración de precapa, con tierra de diatomeas y con perlita	Bacterias	30-50%	96–99,9% con pretratamiento químico con coagulantes o polímeros.
	Virus	90%	98% con pretratamiento químico con coagulantes o polímeros.
	Protozoos	99.90%	99,99%, en función de la calidad del medio y del caudal de filtración.
Filtración de membrana: microfiltración	Bacterias	99,9–99,99%, con un pretratamiento adecuado y si se conserva íntegra la membrana.	
	Virus	<90%.	
	Protozoos	99,9–99,99%, con un pretratamiento adecuado y si se conserva íntegra la membrana	
Desinfección			
Cloro	Bacterias	Ct99: 0,08 mg·min/l a 1–2 °C, pH 7; 3,3 mg·min/l a 1–2 °C, pH 8,5.	
	Virus	Ct99: 12 mg·min/l a 0–5 °C; 8 mg·min/l a 10 °C; ambos a pH 7–7,5.	
	Protozoos	<i>Giardia</i> Ct99: 230 mg·min/l a 0,5 °C; 100 mg·min/l a 10 °C; 41 mg·min/l a 25 °C; todos a pH 7–7,5 No destruye <i>Cryptosporidium</i> .	
Dióxido de cloro	Bacterias	Ct99: 0,13 mg·min/l a 1–2 °C, pH 7; 0,19 mg·min/l a 1–2 °C, pH 8,5.	
	Virus	Ct99: 8,4 mg·min/l a 1 °C; 2.8 mg·min/l a 15 °C, ambos a pH 6-9.	

	Protozoos	<i>Giardia</i> Ct99: 42 mg·min/l a 1 °C; 15 mg·min/l a 10 °C; 7,3 mg·min/l a 25 °C; todos a pH 6-9 <i>Cryptosporidium</i> Ct99: 40 mg·min/l a 22 °C, pH 8.
Ozono	Bacterias	Ct99: 0,02 mg·min/l a 5 °C, pH 6-7.
	Virus	Ct99: 0,9 mg·min/l a 1 °C; 0,3 mg·min/l a 15 °C.
	Protozoos	<i>Giardia</i> Ct99: 1,9 mg·min/l a 1 °C; 0,63 mg·min/l a 15 °C, pH 6-9, <i>Cryptosporidium</i> Ct99: 40 mg·min/l a 1 °C; 4,4 mg·min/l a 22 °C.
Radiación UV	Bacterias	99% de inactivación: 7 mJ/cm ² .
	Virus	99% de inactivación: 59 mJ/cm.
	Protozoos	<i>Giardia</i> 99% de inactivación: 5 mJ/cm ² , <i>Cryptosporidium</i> 99.9% de inactivación: 10 mJ/cm ² .

Fuente: OMS, 2006.

Nota: Ct y UV son para microorganismos en suspensión, no en el seno de partículas ni en biopelículas.

Las reducciones de la carga microbiana indicadas en la tabla 2 corresponden a grupos o categorías generales de microbios: bacterias, virus y protozoos. Esto se debe a que, por lo general, la eficacia de reducción de la carga microbiana de los tratamientos es diferente para cada grupo de microbios, debido a las diferentes propiedades inherentes de los mismos (por ejemplo, su tamaño, la naturaleza de sus capas protectoras exteriores, las propiedades fisicoquímicas de sus superficies, etc.) (OMS, 2006).

2.5 Control de la calidad del agua potable

Se ha comprobado la eficacia, para proteger la salud pública, de un sistema dual en el que se diferencian las funciones y responsabilidades de los proveedores de servicios, de las de una

autoridad responsable de la supervisión independiente para proteger la salud pública (vigilancia del abastecimiento de agua de consumo). Los planes de mantenimiento y mejora de los servicios de abastecimiento de agua de consumo deben tener en cuenta las funciones vitales y complementarias del organismo responsable de la vigilancia y del proveedor de agua (OMS, 2006).

Es preferible que las dos funciones —vigilancia y control de la calidad— sean realizadas por entidades diferentes e independientes debido al conflicto de intereses que se produce cuando ambas funciones se combinan. Así:

- Los organismos nacionales proporcionan un marco de objetivos, normas y leyes para permitir y exigir a los proveedores el cumplimiento de obligaciones definidas.
- Debe exigirse a los organismos que intervienen en el abastecimiento de agua para el consumo por cualquier medio que garanticen y comprueben que los sistemas que administran son capaces de suministrar agua inocua y que lo hacen de forma sistemática.
- Un organismo de vigilancia es responsable de la vigilancia independiente (externa) mediante auditorías periódicas de todos los aspectos relativos a la seguridad, pruebas de verificación, o ambas (OMS, 2006).

En la práctica, es posible que no siempre exista una división clara de las responsabilidades de los organismos proveedores de agua de consumo y los responsables de la vigilancia. En algunos casos, puede haber una gama de instituciones profesionales, gubernamentales, no gubernamentales y privadas más extensa y compleja que la descrita. Sea cual sea el marco existente, es importante elaborar estrategias y estructuras claras para aplicar Plan(es) de Seguridad del Agua (PSA) y sistemas de vigilancia y control de la calidad

2.5.1 Vigilancia de la calidad del agua.

La vigilancia es una actividad de investigación que se realiza para detectar y evaluar posibles riesgos para la salud asociados al agua de consumo. La vigilancia contribuye a proteger la salud pública fomentando la mejora de los llamados «indicadores de servicio» del abastecimiento de agua de consumo: calidad, cantidad, accesibilidad, cobertura (poblaciones con acceso fiable), asequibilidad y continuidad. La autoridad de vigilancia debe tener competencia para determinar

si un proveedor de agua está cumpliendo sus obligaciones (OMS, 2006).

En la mayoría de los países, el organismo responsable de la vigilancia de los servicios de abastecimiento de agua de consumo es el ministerio de salud (o de salud pública) y sus oficinas regionales o departamentales. En algunos países, la responsabilidad puede recaer en un organismo de protección del medio ambiente, mientras que en otros pueden tener cierta responsabilidad las oficinas de salud ambiental de los gobiernos locales.

La vigilancia requiere un programa sistemático de estudios, que pueden incluir auditorías, análisis, inspecciones sanitarias y, en su caso, aspectos institucionales y comunitarios. Debe abarcar la totalidad del sistema de agua de consumo, incluidas las fuentes y las actividades en la cuenca de captación, las infraestructuras de conducción, las plantas de tratamiento, los embalses de almacenamiento y los sistemas de distribución (con o sin tuberías) (OMS, 2006).

Una de las finalidades de un programa de vigilancia debe ser garantizar la pronta adopción de medidas para evitar los problemas y que se corrijan las averías. En ocasiones, puede ser preciso aplicar multas para fomentar y garantizar el cumplimiento de las normas. Por consiguiente, el organismo encargado de la vigilancia debe estar respaldado por leyes sólidas y aplicables. No obstante, es importante que dicho organismo desarrolle una relación positiva con los proveedores y les preste apoyo, recurriendo a la aplicación de multas como último recurso (OMS, 2006).

Así pues, la vigilancia de la calidad del agua puede definirse como la evaluación e inspección sanitarias de la inocuidad y aceptabilidad del suministro de agua potable. La protección sanitaria del abastecimiento de agua potable debe conseguir que cada elemento del sistema (fuente, tratamiento, almacenamiento y distribución) funcione con mínima probabilidad de fallo.

2.6 Métodos de análisis microbiológicos en aguas para consumo humano

El análisis de agua tiene como finalidad principal verificar si el recurso evaluado presenta contaminación por materia fecal humana o de origen animal, ya que este tipo de contaminación constituye uno de los principales indicadores de riesgo sanitario. La detección oportuna de

microorganismos indicadores, como coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli*, permite identificar posibles fallas en los procesos de captación, tratamiento o distribución del agua.

Para obtener resultados confiables, es indispensable realizar muestreos y análisis de manera sistemática y con la frecuencia establecida por la legislación vigente, garantizando así una valoración estadísticamente significativa. Este enfoque no solo facilita determinar si el agua cumple con los requisitos de calidad sanitaria para consumo humano, establecidos en normas como la NOM-127-SSA1-2021, sino que también permite evaluar su idoneidad para otros usos domésticos o industriales.

En este sentido, la implementación de programas de monitoreo continuo y el uso de métodos analíticos estandarizados constituyen herramientas esenciales para prevenir riesgos a la salud pública y asegurar que el suministro de agua mantenga condiciones de inocuidad a lo largo del tiempo (Cambruzzi, 2016).

2.6.1 Método de filtración por membrana

El método de filtración por membrana es utilizado para la detección de coliformes totales y fecales (*E. coli*), es un método altamente reproducible, puede usarse para analizar muestras relativamente grandes y se obtienen resultados en menor tiempo, comparado con el método del NMP.

La filtración por membrana es el método mediante el cual se atrapan, en la superficie de la membrana, microorganismos cuyo tamaño es mayor que el tamaño del poro 0.45 μm , esto gracias a que una bomba eléctrica ejerce una presión diferencial sobre la muestra de agua haciendo que se filtre. Los contaminantes de tamaño menor que el específico del poro atraviesan la membrana o se quedan retenidos en su interior, las bacterias quedan en la superficie de la membrana y luego ésta es llevada a un medio de enriquecimiento selectivo para su posterior desarrollo de colonias presentes.

Una membrana adecuada para las pruebas de esterilidad posee un tamaño de poro de 0,45 μm , un diámetro aproximado de 47 - 50 mm, y tiene un borde hidrofóbico o de baja retención de

producto para minimizar la inhibición microbiana de los residuos que puedan quedar retenidos en la membrana (IDEAM, 2007).

Se debe utilizar filtro de membrana de un diámetro de poro que permita una completa retención de las bacterias coliformes. Se toma en cuenta que estos filtros están libres de químicos susceptibles a inhibir el crecimiento y desarrollo bacteriano, que posean una velocidad de filtración satisfactoria (MILLIPORE, 2005).

2.7. Normatividad aplicable

La calidad microbiológica del agua destinada al consumo humano en México está regulada por un conjunto de Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX) que establecen los requisitos técnicos y sanitarios que deben cumplirse para garantizar su inocuidad. Estas disposiciones normativas definen parámetros, límites permisibles, metodologías de análisis y buenas prácticas de producción, constituyendo el marco de referencia para la vigilancia y control de la calidad del agua purificada.

En la presente investigación, se consideraron principalmente las siguientes disposiciones:

- **NMX-AA-102-SCFI-2006** y el **PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018**
Calidad del agua – Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y *Escherichia coli* presuntiva – Método de filtración por membrana. Esta norma establece el procedimiento técnico para la identificación y cuantificación de bacterias coliformes y *E. coli* en muestras de agua, empleando el método de filtración por membrana. Incluyen especificaciones sobre el volumen de muestra, condiciones de incubación, medios de cultivo y criterios de interpretación de resultados. Su aplicación es fundamental en estudios de control microbiológico, dado que permiten detectar contaminaciones recientes de origen fecal y evaluar la efectividad de los procesos de purificación.
- **NOM-127-SSA1-2021**
Agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Es la norma principal que define los límites máximos permisibles para parámetros

microbiológicos, físicos y químicos del agua de consumo. En cuanto a la calidad microbiológica, establece la ausencia obligatoria de coliformes totales, coliformes fecales y *E. coli* en 100 mL de muestra. Además, indica métodos de referencia para la verificación y señala la periodicidad mínima de los controles. En el contexto de este estudio, esta norma fue la base para evaluar el cumplimiento de las plantas rellenadoras analizadas.

- **NOM-160-SSA1-1995**

Bienes y servicios – Agua purificada envasada – Especificaciones sanitarias. Esta norma detalla las buenas prácticas de manufactura para la producción, manejo, almacenamiento y distribución de agua purificada envasada. Incluye requisitos sobre higiene del personal, sanitización de envases y equipos, control de procesos y condiciones de almacenamiento. Su observancia es clave para minimizar la contaminación del agua después del proceso de purificación.

En conjunto, estas normativas buscan garantizar que el agua que llega al consumidor sea inocua, es decir, libre de microorganismos patógenos y sustancias nocivas. Asimismo, armonizan la legislación nacional con las recomendaciones internacionales emitidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que promueve la aplicación de sistemas de vigilancia y planes de seguridad del agua para prevenir riesgos sanitarios.

El incumplimiento de estas disposiciones puede derivar en sanciones administrativas y en la clausura temporal o definitiva de establecimientos, además de implicar riesgos significativos para la salud pública. Por esta razón, el apego estricto a la normatividad debe ser considerado no solo una obligación legal, sino una responsabilidad ética de los productores y distribuidores de agua purificada.

En la tabla 3 se presenta un resumen de la normatividad aplicada en este trabajo:

Tabla 3. Normatividad aplicable en calidad de agua para consumo humano.

Normatividad	Alcance	Aplicación en el estudio
NMX-AA-102-SCFI-2006 y PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018	Método de filtración por membrana para detección y enumeración de coliformes y <i>E. coli</i>	Base metodológica para el análisis microbiológico

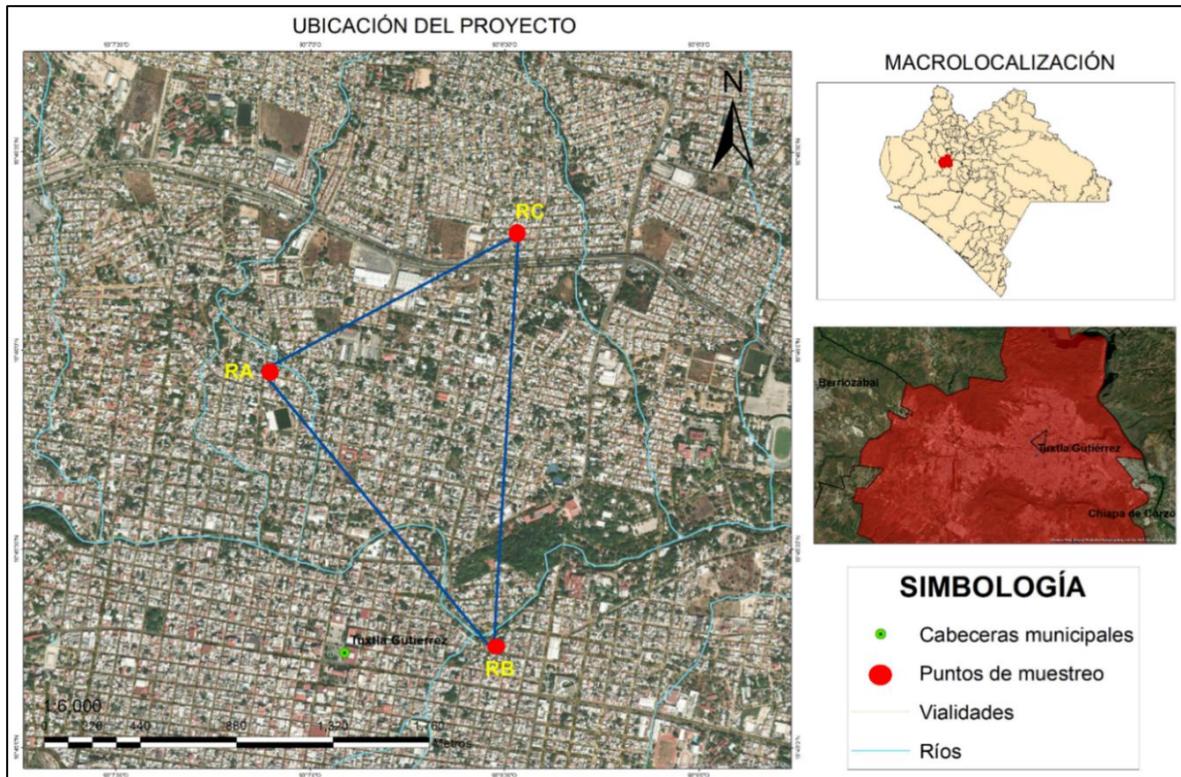
NOM-127-SSA1-2021	Límites permisibles de calidad para agua de consumo humano	Criterio para evaluar el cumplimiento de las muestras
NOM-160-SSA1-1995	Buenas prácticas de producción y venta de agua purificada	Referencia para identificación de posibles deficiencias operativas

3. Materiales y Métodos

3.1 Área de estudio

El área de estudio se ubicó en la zona noreste de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, se analizó el agua purificada de 3 rellenadoras que ofertan el servicio en la zona, tal y como se muestra en la figura 1. Estas plantas funcionan como una alternativa accesible para la población que requiere agua purificada de manera constante, y son parte del amplio sector de microempresas locales encargadas del suministro de agua para consumo humano. Es importante mencionar que estas plantas fueron elegidas con base en su nivel de afluencia, representatividad en la zona y fácil acceso para la recolección de muestras, mismos que se mantuvieron anónimos por lo que se nombraron a las rellenadoras de la zona noreste como: rellenadora A, rellenadora B y rellenadora C.

Figura 1. Ubicación de las plantas purificadoras muestreadas en la zona noreste de Tuxtla.



Fuente: Elaboración propia.

Las 3 plantas rellenadoras evaluadas presentan ciertas características comunes en su operación, puesto que ofrecen el servicio de llenado y venta de agua purificada en garrafones, cuentan con infraestructura básica para el manejo del agua purificada, así como personal que se encarga de los procesos de llenado, atención al cliente y cobro. Se observaron condiciones generales de operación que incluyen espacios amplios, visiblemente limpios, señalización adecuada, atención uniforme por parte del personal y horarios establecidos de servicio.

El proceso operativo básico consiste en la recepción de garrafones vacíos traídos por los clientes, enjuague y llenado automático o semiautomático mediante equipos conectados a sistemas de purificación. La desinfección de los garrafones se realiza de forma manual o con enjuague a presión, sin evidencia clara de uso sistemático de agentes sanitizantes.

En cuanto al personal, la rellenadora B y C cuentan solo con un personal mientras que en la rellenadora A se identificó a 2 personas laborando en dicho establecimiento, quienes cumplen funciones tanto administrativas como operativas. Algunos portan uniforme, pero en general, no se observó el uso obligatorio de equipo de protección personal (guantes, cofias o cubrebocas).

El servicio al cliente se caracteriza por rapidez y accesibilidad en el precio, lo que favorece una alta demanda. Bajo este contexto, la evaluación de estas plantas permite identificar posibles deficiencias en los procesos de purificación, así como riesgos potenciales para la salud pública debido a una eventual presencia de microorganismos patógenos en el agua que ofrecen.

3.2 Muestreo

La metodología se realizó de acuerdo con lo establecido en la NMX-AA-102-SCFI-2006 y el PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018, donde menciona los pasos a seguir para la recolección, muestreo, procedimiento y expresión de resultados para el análisis microbiológico, aplicando el método de filtración por membrana que permite la detección y cuantificación de microorganismos mediante la retención en un filtro de membrana con poros de tamaño controlado.

Se realizaron tres muestreos, iniciando el primero a partir de junio y finalizando el último muestreo en el mes de diciembre, realizando de esta manera una frecuencia de muestreo trimestral para el período de estudio, con la finalidad de evaluar la calidad microbiológica del agua purificada comercializada en las tres rellenadoras previamente seleccionadas.

3.2.1 Recolección de la muestra

Para la recolección de la muestra del agua purificada procedente de las rellenadoras de la zona Noreste, se utilizaron garrafones con una capacidad de 2 litros cada uno, así mismo, el proceso de recolección de las muestras se realizó bajo condiciones simuladas de compra-venta normal del agua. En la figura 2 se muestran los recipientes utilizados para la recolección de las muestras en estudio.

Figura 2. Recolección de las muestras.



Se estableció una frecuencia de muestreo trimestral, con un total de tres muestreos en el período de estudio. Así mismo, la recolección de las muestras se realizó durante la mañana para poder transportarlos en un tiempo no mayor a seis horas, por lo que fueron trasladadas, inmediatamente después de su recolección al laboratorio del programa educativo de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, para su posterior análisis en laboratorio.

3.3 Equipo y material de laboratorio

De acuerdo con la NMX-AA-102-SCFI-2006 y el PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018 a continuación se presenta el equipo y los materiales de laboratorio que se requirieron para la realización del análisis microbiológico (Tabla 4).

Tabla 4. Equipo y material de laboratorio para análisis microbiológico.

Equipos	Materiales
Autoclave	Membranas filtrantes estériles. 0.45 μm , 47 mm diámetro, blancos, cuadrículados y sellados individualmente
Incubadora	Pinza de bordes lisos

Equipo para filtración por membrana	Caja Petri precargadas con cojín absorbente, estériles de 47 mm de diámetro Medios de cultivos selectivos
Bomba o sistema de vacío	Material común de laboratorio.

Fuente: MilliporeSigma, 2023

*Autoclave que mantenga una temperatura de al menos 121 °C o una presión manométrica de 103 kPa, durante 15 minutos.

*Membranas filtrantes estériles de aproximadamente 44 o 50 mm de diámetro.

*Material de laboratorio tales como: Mecheros, probetas, pipetas graduadas, etc.

3.3.1 Medio de cultivo

Se utilizó un medio de cultivo comercial “Milliflex, agar m-endo” en ampollas de plástico de 2 mL, este es un medio diseñado para la recuperación de coliformes.

En la tabla 5 se presenta la ficha de información biológica del medio de cultivo obtenida de la página MilliporeSigma, 2023.

Tabla 5. Información biológica del medio de cultivo.

Información biológica	
Aspectos del microorganismo	Las colonias son de color rojo oscuro con un brillo verde metálico distintivo
Medio de agar prellenado	m- Endo LES
Organismo de calidad de control	<i>E. coli</i> (ATCC 25922) <i>P. aeruginosa</i> (ATCC 9027) <i>E. aerogenes</i> (ATCC 49701) <i>S. aureus</i> (ATCC 6538)
Mircroorganismos seleccionados	Coliformes

Temperatura de selección	35°
Tiempo de incubación	24 hrs
Color del medio	Color rosa, ligeramente opalescentes
Forma de los medios	Agar

Fuente: MilliporeSigma, 2023.

3.3.2 Análisis microbiológico

Continuando con lo señalado en la NMX-AA-102-SCFI-2006 y el PROY-NMX-AA-102-SCFI-2018, el análisis microbiológico se describe a continuación:

1. Selección del volumen a filtrar

Para el filtrado, se seleccionó un volumen de 100 mL por cada muestra de agua purificada, considerando que no se esperaba obtener presencia de microorganismos formadores de colonias. No se realizó dilución.

2. Filtración

Después de asegurar un área de trabajo estéril, se hizo pasar cada una de las muestras de agua a través del filtro de membrana micro porosa, en cuya superficie quedaron retenidos los microorganismos presentes.

Tal y como se observa en la figura 3, se homogenizó la muestra agitándola con movimientos de arriba hacia abajo y se vertió los 100 mL en el equipo de filtración y se aplicó vacío para hacer pasar la muestra a través de la membrana. El vacío no excedió las 15 libras de presión.

Figura 3. Proceso de filtración de muestras.



Después de la filtración, la membrana se colocó en el medio selectivo para coliformes totales y fecales, con la ayuda de pinzas estériles, el medio selectivo fue colocado previamente en cajas Petri estériles, con cojín, de 47mm.

3. Incubación

Las cajas Petri se invirtieron para después incubarlas por un periodo de 24 horas, a una temperatura de 37 °C para coliformes totales y 44°C para coliformes fecales (figura 4).

Figura 4. Proceso de incubación.



4. Expresión de resultados

Los resultados se obtuvieron a las 24 horas de incubación. A partir del número de colonias confirmadas, contadas en el filtro de membrana, se calculó los números de bacterias coliformes presentes en los 100 mL de la muestra (figura 5). El conteo de bacterias coliformes totales es la suma de las colonias que tomaron un color rosa a rojo y de las colonias fecales, las de color azul oscuro a violeta, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Colonias coliformes totales}}{\text{Volumen de referencia}} = \frac{\text{Colonias coliformes contadas} \times \text{volumen de referencia}}{\text{Volumen filtrado de muestra}}$$

Expresión de resultados: UFC/100 mL. de muestra.

Cabe mencionar que el conteo se llevó a cabo de forma directa dado que no se realizó dilución en las muestras, puesto que, por su naturaleza y procesos de tratamiento, este tipo de muestras de agua purificada deben presentar nula o baja carga microbiana (figura 5). Dado que el objetivo del estudio era evaluar la presencia de coliformes en condiciones reales de consumo, se optó por analizar las muestras sin modificación alguna, asegurando así resultados más representativos y comparables con los límites establecidos en la normatividad vigente.

Figura 5. Conteo de colonias confirmadas.

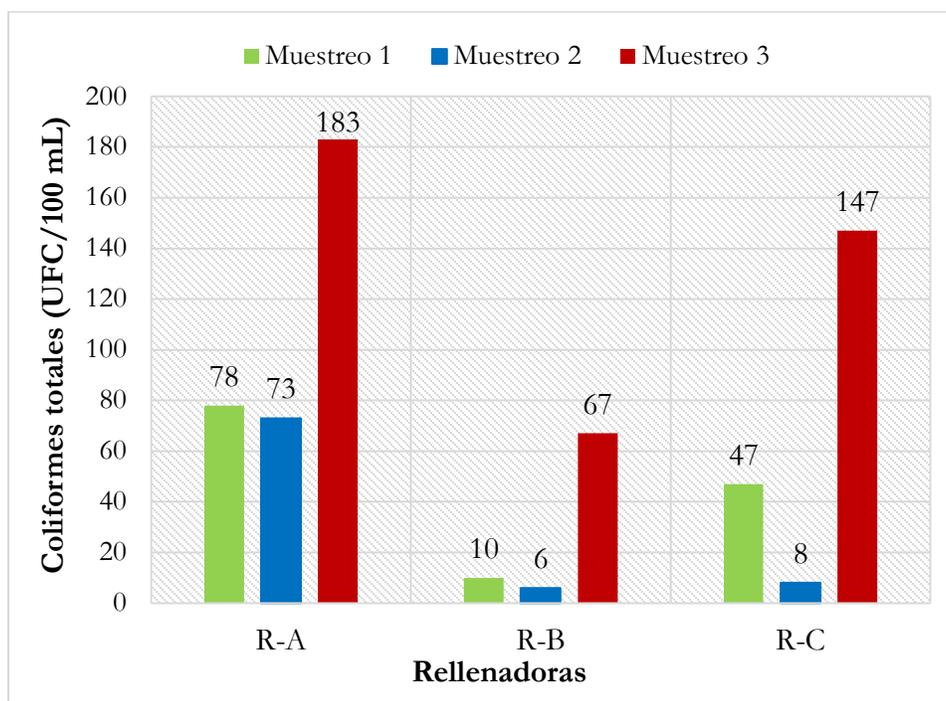


4. Resultados y Análisis

Los resultados obtenidos durante los tres muestreos realizados, evidencia la presencia de coliformes totales y fecales, en cada uno de los establecimientos evaluados, superando los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021, que estipula la ausencia de estos microorganismos en el agua para consumo humano. Se observa que la rellenadora A es la que tuvo un mayor crecimiento de colonias de coliformes totales, principalmente en el muestreo 3 (183 UFC/100 mL); para el caso de la rellenadora B, es la que presentó menor cantidad de colonias detectadas

(rango de 6-67 UFC/100 mL) en los muestreos realizados, sin embargo, sigue superando los límites permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2021. En el siguiente gráfico se representan los resultados descritos anteriormente.

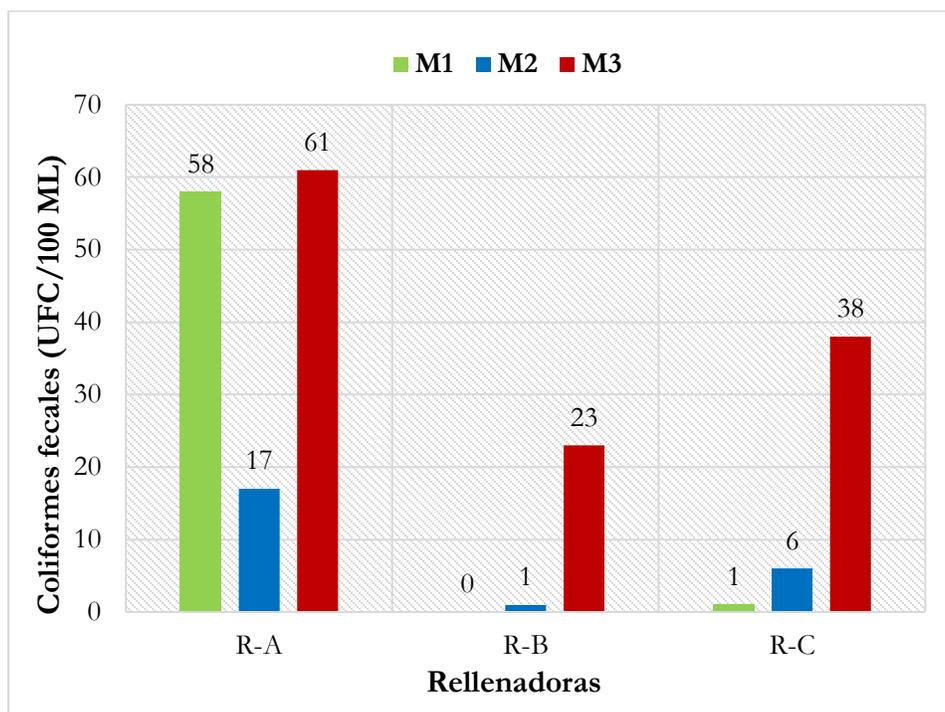
Figura 6. Resultados obtenidos de coliformes totales para los muestreos: M-1 (28-jun-2023), M-2 (26-sept-2023) y M-3 (05-dic.2023).



Fuente: Elaboración propia

Así mismo, en la figura 7 se muestra la gráfica de los resultados obtenidos de los muestreos para coliformes fecales, en el que se visualiza como la rellena A presenta una mayor cantidad de UFC con respecto a la rellena B y C, además de presentarse un incremento significativo en el tercer muestreo realizado. Es pertinente mencionar que se encontraron colonias de color verde metálico en la rellena C (R-C) que, de acuerdo con Ríos *et al.*, (2017), el color verde metálico es presuntivo de *E. coli*, y la presencia de *E. coli* en muestras de agua potable, da indicios a la existencia de fallas en la eficacia de tratamiento de aguas.

Figura 7. Resultados obtenidos de coliformes fecales para los muestreos: M-1 (28-jun-2023), M-2 (26-sept-2023) y M-3 (05-dic.2023).



Fuente: Elaboración propia

En este sentido, los datos obtenidos y plasmados en las gráficas anteriores muestran una tendencia al incremento de la contaminación microbiológica en el último muestreo, especialmente en las rellenas A y C, donde los valores de coliformes totales y fecales superaron los 100 UFC/100 mL. La rellena B presentó menor contaminación en los primeros dos muestreos, pero en el tercero, también mostró un aumento significativo.

Los resultados indican que ninguna de las rellenas analizadas garantiza la inocuidad del agua que comercializa, lo que representa un riesgo potencial para la salud pública. La presencia de coliformes fecales sugiere una deficiente sanitización en los procesos de purificación y en el manejo del agua envasada, esto de acuerdo con Benítez *et al.*, (2013). Este análisis subraya la necesidad de fortalecer los controles de calidad y las buenas prácticas de manufactura en las plantas rellenas para garantizar la distribución de agua segura para el consumo humano.

5. Análisis estadístico de los muestreos

A partir de los datos presentados en la tabla 6, se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con el fin de identificar diferencias significativas en las concentraciones de coliformes totales entre las rellenadoras muestreadas, además se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey para identificar entre que rellenadoras se encuentran estas diferencias. Los resultados detallados de estas pruebas estadísticas se presentan en el Anexo B.

En el muestreo 1, de acuerdo al ANOVA, se obtuvo un valor de $P = 0.022$, lo cual mostró que hay diferencias estadísticamente significativas en al menos uno de los tratamientos y la prueba de Tukey permitió ver que esas diferencias se dieron entre la rellenadora A y la rellenadora B. En el muestreo 2, el ANOVA mostró diferencias altamente significativas entre las rellenadoras ($p < 0.001$), y de acuerdo con la prueba de Tukey la rellenadora A mostró niveles significativamente más altos que la rellenadora B y C, lo que indica un foco importante de contaminación en ese punto específico. Finalmente, en el muestreo 3, también se detectaron diferencias significativas ($p = 0.017$). El análisis de Tukey mostró que la diferencia significativa se encuentra entre la rellenadora A y la rellenadora B.

Tabla 6. Resultados de concentración de coliformes totales (UFC/100 mL) por muestreo y comparaciones estadísticas según la prueba de Tukey.

Muestreo 1			Muestreo 2			Muestreo 3		
R-A	R-B	RC	R-A	R-B	R-C	R-A	R-B	R-C
48	112	74	11	7	12	63	53	28
58	86	75	2	9	7	11	8	5
193	188	168	68	87	46	83	177	181
Método Tukey muestreo 1			Método Tukey muestreo 2			Método Tukey muestreo 3		
Comparison	Diff of Means	P	Comparison	Diff of Means	P	Comparison	Diff of Ranks	P
R-A vs. R-B	68	0.019	R-A vs. R-B	67.5	<0.001	R-A vs. R-B	117.667	0.015
R-A vs. R-C	30	0.273	R-A vs. R-C	47.5	0.002	R-A vs. R-C	37.667	0.442
R-C vs. R-B	38	0.154	R-C vs. R-B	20	0.208	R-C vs. R-B	80.000	0.072

A partir de los datos reportados en la tabla 7, se aplicó nuevamente el análisis ANOVA para evaluar diferencias entre las rellenadoras en cuanto a coliformes fecales. Los resultados detallados de estas pruebas estadísticas se presentan en el Anexo B. Sin embargo, para el muestreo 1, al no cumplirse el supuesto de normalidad ($p < 0.05$), se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, la cual también detectó diferencias significativas ($p = 0.011$). La prueba de comparaciones múltiples indicó que estas diferencias se presentaron entre la rellenadora A y la rellenadora B.

En el muestreo 2, de acuerdo al ANOVA se obtuvo un valor de $P = 0.014$, por lo que se confirmó que existen diferencias significativas en al menos una de las rellenadoras, es así como, en la prueba de Tukey mostró que estas diferencias se encuentran entre la rellenadora A y B. Finalmente, en el muestreo 3, se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p = 0.018$), nuevamente entre la rellenadora A y la rellenadora B, siendo la rellenadora A la que registró las concentraciones más elevadas de coliformes fecales.

Tabla 7. Resultados de concentración de coliformes fecales (UFC/100 mL) por muestreo y comparaciones estadísticas según la prueba de Tukey.

Muestreo 1			Muestreo 2			Muestreo 3		
R-A	R-B	RC	R-A	R-B	R-C	R-A	R-B	R-C
64	26	84	0	0	0	2	1	0
24	18	9	0	0	3	8	6	4
51	49	83	27	23	19	37	41	36
Método Tukey muestreo 1			Método Tukey muestreo 2			Método Tukey muestreo 3		
Comparison	Diff of Means	p	Comparison	Diff of Means	p	Comparison	Diff of Ranks	P
R-A vs. R-B	16.5	3.479	R-A vs. R-B	16	0.013	R-A vs. R-B	38	0.015
R-A vs. R-C	10.5	2.214	R-A vs. R-C	11	0.06	R-A vs. R-C	23	0.105
R-C vs. R-B	6	1.265	R-C vs. R-B	5	0.433	R-C vs. R-B	15	0.31

6. Discusión de resultados

El análisis microbiológico realizado en las plantas rellenadoras de la zona noreste de Tuxtla Gutiérrez, evidenció la presencia de coliformes totales y fecales en los diferentes muestreos, lo que indica una calidad microbiológica inadecuada del agua comercializada para el consumo humano. Estos resultados coinciden con lo reportado por Jiménez (2018), quien menciona que los límites microbiológicos permisibles de una muestra simple de agua deben ajustarse a lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994, que estipula que tanto los coliformes totales como los fecales deben estar ausentes o no ser detectados en las muestras de agua para consumo humano.

En este contexto, varios estudios han documentado la detección de coliformes totales en agua de rellenadoras con conteos que exceden los estándares de agua potable para consumo humano, los cuales coinciden con los resultados reportados en el presente estudio. Tal es el caso de la investigación para determinar la calidad bacteriológica de las plantas purificadoras realizada en la Costa de Chiapas por Magdaleno *et al.*, (2019), en el que el 79% del total de las muestras de agua purificada fueron positivo para bacterias mesofílicas aerobias y del 25% de cuando menos una muestra dio positivas para coliformes totales. Por lo que se mencionó que los resultados del estudio presentaron una insatisfactoria calidad microbiológica derivado de falta de tratamiento de higienización y buenas prácticas de manufactura.

Es así como uno de los principales factores que influyen en la contaminación detectada está relacionado a la falta de un adecuado control de calidad en los procesos de purificación del agua. La ausencia de planes de limpieza, higienización y capacitación del personal impacta directamente en la inocuidad del producto final. Esto pone en riesgo la seguridad del consumidor, ya que la producción no cumple con los estándares necesarios para garantizar un consumo seguro. Los datos obtenidos reflejan estas deficiencias, evidenciando la necesidad de mejorar los procesos para prevenir posibles afectaciones a la salud pública.

De manera similar, este trabajo de investigación coincide con lo reportado por Becerra *et al.*, (2019) y Cepeda *et al.*, (2022), quienes encontraron contaminación de coliformes fecales en agua envasada con recuentos superiores a los establecidos por las normas de calidad. De acuerdo con Benítez *et al.*, (2013), es posible deducir que las condiciones microbiológicas de las plantas

rellenadoras evaluadas, reflejan una inadecuada calidad microbiológica del agua para consumo humano, lo que repercute en el riesgo para la salud de los consumidores.

Además, enfatiza que la higiene e inocuidad se perciben por el número y tipo de microorganismos presente en el agua purificada, por ende, la ausencia de buenas prácticas de manufactura en las plantas rellenas, impacta directamente en la inocuidad del producto. También Cázares *et al.*, (2014), afirman en su estudio sobre el análisis microbiológico de la calidad del agua de ciudad Nezahualcóyotl en el estado de México, que existen las condiciones microbiológicas para considerarse no potable, ya que todas las muestras presentan un número importante de coliformes totales, fecales y *E. coli*, lo que indica que el agua está contaminada con materia fecal.

De forma similar a lo observado en este estudio, Oblitas & Torres (2016) identificaron la presencia de coliformes totales, coliformes fecales y *E. coli* en muestras de agua potable provenientes de reservorios administrados por juntas de servicio en el distrito de Cajamarca, Perú. En dicho trabajo, la cuantificación de estos indicadores bacterianos permitió evidenciar contaminación de origen fecal y fallas en el manejo del sistema de distribución, situación que coincide con lo encontrado en las plantas rellenas evaluadas en la zona noreste de Tuxtla Gutiérrez, donde se detectó la presencia de los mismos microorganismos en niveles superiores a los establecidos en la NOM-127-SSA1-2021.

Por otro lado, Noriega & Martínez (2017), al evaluar la calidad del agua para consumo humano en el corregimiento de La Peña, Atlántico (Colombia), concluyeron que la contaminación biológica por coliformes totales y fecales, junto con otros parámetros fuera de rango (como alcalinidad y oxígeno disuelto), representa un riesgo sanitario alto para la población. Estos hallazgos refuerzan la importancia de mantener una vigilancia estricta y aplicar medidas correctivas inmediatas, ya que, al igual que en el presente estudio, evidencian que la presencia de indicadores microbiológicos por encima de los límites normativos compromete la inocuidad del agua y la salud pública.

Bajo este contexto, la calidad del agua para consumo humano es un factor determinante en las condiciones de la salud de las poblaciones, sus características pueden favorecer tanto la prevención como la transmisión de agentes patógenos. Es por ello que se subraya la necesidad

de fortalecer la regulación y monitoreo de las plantas rellenadoras, así como la implementación de medidas correctivas para garantizar la seguridad microbiológica del agua distribuida en la región.

7. Conclusiones

Los resultados revelan que el agua purificada de las rellenadoras muestreadas presentan contaminación microbiológica, con valores desde 1 hasta 183 UFC/100 ml. Lo anterior considerando que la NOM-127-SSA1-1994 establece que los valores para coliformes fecales o totales deben estar ausentes o no detectados en agua para consumo humano.

Así también, los resultados de los muestreos indicaron que la contaminación microbiológica aumentó progresivamente a lo largo del estudio, siendo el tercer muestreo el que presentó los valores más elevados, con las rellenadoras A y C superando las 100 UFC/100 mL de coliformes totales. La rellenadora B, aunque mostró niveles más bajos en los primeros dos muestreos, presentó un aumento significativo en el último análisis, lo que sugiere deficiencias en el control del proceso de purificación.

Los resultados obtenidos mediante ANOVA y la prueba de Tukey permitieron identificar diferencias significativas en la concentración de coliformes totales y fecales entre los puntos de muestreo. En todos los muestreos analizados, la rellenadora A mostró consistentemente las concentraciones más elevadas, siendo estadísticamente diferentes respecto a las demás rellenadoras en varias ocasiones. Estos hallazgos sugieren que la rellenadora A representa un posible foco prioritario de contaminación microbiológica.

Es así como los resultados del presente estudio evidenciaron que la calidad microbiológica del agua purificada comercializada en las plantas rellenadoras de la zona noreste de Tuxtla Gutiérrez no cumple con los estándares establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, lo que indica deficiencias en los procesos de purificación y en la implementación de buenas prácticas de manufactura.

La presencia de microorganismos indicadores de contaminación, representa un riesgo potencial para la salud pública, por lo que es fundamental que las autoridades competentes y los responsables de estas plantas implementen medidas correctivas. Solo a través de un control

riguroso y un cumplimiento estricto de la normatividad vigente se podrá asegurar que el agua distribuida sea apta para el consumo humano y no represente un peligro sanitario.

Ante esta problemática, es fundamental fortalecer la regulación sanitaria, implementar inspecciones más estrictas y garantizar el cumplimiento de buenas prácticas de manufactura en estos establecimientos.

8. Recomendaciones

- Es necesaria la participación de las autoridades correspondientes en la materia para que este tipo de establecimientos cuenten con un monitoreo constante, que asegure la calidad del producto que comercializa, dado que puede ser un foco de infección de enfermedades y poner en riesgo la salud de los consumidores.
- Implementar un control de calidad estricto, ya que es fundamental que las plantas rellenas establezcan protocolos de control interno, incluyendo análisis fisicoquímicos y microbiológicos periódicos del agua para detectar cualquier desviación en los parámetros de calidad.
- Se debe verificar el correcto funcionamiento de los sistemas de purificación, como filtración por membrana, ozonización y cloración, asegurando su mantenimiento regular para evitar fallas en la descontaminación del agua, de esta forma se busca optimizar los procesos de filtración y desinfección. Así también es fundamental que se impartan capacitaciones sobre buenas prácticas de manufactura, higiene y manejo del agua a los trabajadores de las plantas rellenas.
- Las instalaciones deben mantenerse en condiciones óptimas para evitar la contaminación cruzada. Es por ello que se recomienda la limpieza frecuente de tuberías, tanques de almacenamiento y áreas de llenado, además de asegurar una desinfección adecuada de los garrafones antes del llenado.
- Es importante sensibilizar a la población sobre la calidad del agua y fomentar la denuncia de posibles irregularidades en los establecimientos que no cumplan con la normativa sanitaria.

La implementación de estas medidas permitirá mejorar la calidad microbiológica del agua distribuida, reduciendo los riesgos sanitarios asociados a su consumo. Es fundamental que tanto las autoridades como los responsables de las plantas rellenas asuman un compromiso con la seguridad y bienestar de la población.

9. Referencias

- Añorve Baños, M. (s.f.). Garantizar el derecho de toda persona al agua purificada en forma. Senado de la República.
- Alarcón MA, Bertrán M, Cárdenas M, Campos MC. Recuento de determinación de *giardia spp.* y *cryptosporidium* en aguas potables y residuales en la cuenca alta del río Bogotá. Biomédica. 2005; 25(3):353-65.
- Andino F, Castillo Y. (2010). Microbiología de los Alimentos: Un enfoque práctico para la inocuidad alimentaria.
- Becerra, C., Soria, R., Domínguez, K., y Cerna, J. (2019). Análisis microbiológico de agua en pequeñas plantas potabilizadoras para consumo humano de Morelia Michoacán. Avances De Investigación En Inocuidad De Alimentos, 02, 1-13.
- Benítez Payares, B. M., Ferrer Villasmil, K. J., Rangel Matos, L. C., Ávila Larreal, A. G., Barboza, Y., & Levy, A. (2013). Calidad microbiológica del agua potable envasada en bolsas y botellas que se venden en la ciudad de Maracaibo, estado Zulia-Venezuela. Multiciencias, 13(1), 16-22.
- Brown, R.L. (2003), Salvar el planeta, Barcelona, Paidós
- Cambuzzi, N. (2016). Indicadores De Contaminación Microbiológico en el Estuario Del Río Negro. Río Negro, Universidad Nacional.
- Cancino, M. E. (2021). Análisis fisicoquímico y microbiológico de agua Purificada en el barrio san ramón del municipio de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, acorde a la norma oficial mexicana NOM-127-ssa1-1994. Repositorio UNICACH. <https://hdl.handle.net/20.500.12753/4381>
- CONAGUA. (2006). El agua en México. México, D. F: D.R. Subdirección General De Programación.
- Espigares, E., Espínola J. M. (2020). Calidad de las aguas para consumo humano y

principales riesgos sanitarios. Hig. Sanid. Ambient. 20 (3): 1887-1895.

- FAO-OMS. Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas/Organización Mundial de la Salud. Caracterización de peligros de patógenos en los alimentos y el agua: Directrices. Serie Evaluación de riesgos microbiológicos N-3 Ginebra, Suiza. (2003). Disponible en: <http://www.who.int/foodsafety/publications/micro/en/spanish.pdf>. 2003
- Faviel Cortez, Elba, Infante Mata, Dulce, & Molina Rosales, Dolores O. (2019). Percepción y Calidad De Agua en Comunidades Rurales Del Área Natural Protegida La Encrucijada, Chiapas, México. Revista internacional de contaminación ambiental, 35(2), 317-334. Epub 19 de febrero de 2020. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.02.05>
- Glasmacher A, Engelhart S, Exner M. (2003). Infections from HPC organisms in drinking water amongst immunocompromised. En: Bartram J, Cotruvo J, Exner M, Fricker C, Glasmacher A, editors. Heterotrophic plate counts and drinking-water safety. Londres: WHO IWA Publishing: p.137-45.
- Graniel, C. E., & Carrillo, C. M. (2006). Calidad del agua del río Zanatenco en el estado de Chiapas. Ingeniería. Mérida, México: Universidad Autónoma de Yucatán.
- IDEAM. (2007). Coliformes totales y *E. coli* por el método de filtración por membrana en agar chromocult. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Coliformes+totales+y+E.+coli+en+Agua+Filtraci%C3%B3n+por+Membrana.pdf/5414795c-370e-48ef-9818-ec54a0f01174>.
- IMTA. (23 de octubre de 2019). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Obtenido de GOBOERNO DE MÉXICO: <https://www.gob.mx/imta/articulos/el-agua-en-la-constitucion#:~:text=En%20el%20art%C3%ADculo%204%2C%20p%C3%A1rrafo,%20salubre%20aceptable%20y%20asequible>.
- Jordan M, Britto D. Evaluación de la calidad microbiológica del agua en producción pecuaria en municipios de Risaralda, Colombia-2017. [Tesis]. Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 2017.
- Magdaleno, C. E., Canseco Ávila, L., Elorza Claros, M., Domínguez Arrevillaga, S., Espinosa Ruiz, M., & Aguilar Fuentes, J. (2019). Las microempresas de purificación de

agua en la costa de Chiapas: calidad bacteriológica y puntos de riesgo críticos. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 19 (4).

- Méndez, I. G., & Alcántara Araujo, J. J. (2014). Análisis Microbiológico de la Calidad del Agua de Ciudad Nezahualcóyotl, acorde a la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994. Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación.
- Mesa Mesa, J. J. (2010). Estrategia de Capacitación en Análisis de Riesgos, Identificación y Control de Puntos Críticos en 14 Purificadoras de Agua de la Jurisdicción Sanitaria de Orizaba, Veracruz. Cuernavaca, Morelos: Instituto Nacional de Salud Pública.
- Mejía Taboada, L. M., Zelada Herrera, M. E., & Carbajal García, D. L. O. (2021). Análisis microbiológico del agua para consumo humano de la población del centro poblado pachapiriana, distrito de chontalí, provincia de Jaén– 2019. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(6), 13750-13766. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1355
- MILIPORE, (2005). Análisis microbiológico. Madrid, España. 48 páginas.
- Nelson K, (2003). Concentrations and inactivation of *Ascaris* eggs and pathogen indicator organisms in wastewater stabilization pond sludge. *Water Sci Technol*;48:89-95.
- Noriega, J. P. G., & Martínez, A. C. R. (2017). Análisis de la calidad de agua para consumo humano en el corregimiento de la Peña-Atlántico y determinación del riesgo potencial para la salud humana. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/277>
- Núñez N, Fraile I, Lizarazu J. (2009). Microorganismos patógenos del agua. Estudio de Molinao Erreka. *Meridies [Revista en Internet]*; (13):69–76. Disponible en: <http://www.laanunciataikerketa.com/trabajos/microorganismos/in.html>.
- Oblitas Terrones, Y. G., & Torres Chávez, L. M. (2016). Identificación de coliformes totales, coliformes fecales y *Escherichia coli* aisladas del agua potable del distrito de Cajamarca. <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/454>.
- Organización Mundial de la Salud. Guidelines for Drinking-water Quality [Internet]. Geneva; 2011. 564 p. Disponible en: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf
- ODS 6 Agua limpia y saneamiento | Pacto Mundial ONU. (2023b, abril 20). Pacto

Mundial. <https://www.pactomundial.org/ods/6-agua-limpia-y-saneamiento/>

- OMS, Organización Mundial de la Salud (2007): http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/facts2004/es/index.html
- OMS (2006). Guía para la calidad del agua potable. Vol.1 Primer apéndice de la tercera edición.
- OMS (2006). Guías para la calidad del agua potable. 3rd ed. OMS, pp.1-408.
- Taboad, L. M., Zelada Herrera, M. E., & Carbajal García, L. O. (2019). Análisis microbiológico del agua para consumo humano de la población del centro poblado pachapiriana, distrito de chontalí, provincia de Jaén– 2019. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 2-17.
- Vázquez G, Castro G, González I, Pérez R, Castro T. (2006). Bioindicadores como herramientas para determinar la calidad del agua. *ContactoS [Revista en Internet]* [Acceso 27 de agosto de 2015]; (60): 41–8. Disponible en: <http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n60ne/Bio-agua.pdf>
- Venegas, B., Tello Hernández, M., Cepeda Cornejo, V., & Molina Romero, D. (2022). Calidad microbiológica: detección de *Aeromonas* sp y *Pseudomonas* sp en garrafones provenientes de pequeñas plantas purificadoras de agua. *Biotechnología y Ciencias Agropecuarias*, 1-19.
- Rios S, Agudelo R, Gutiérrez L. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*.
- Silva J, Ramírez L, Alfieri A, Rivas G, Sánchez M. (2004). Determinación de microorganismos indicadores de calidad sanitaria. Coliformes totales, coliformes fecales y aerobios mesófilos en agua potable envasada y distribuida en San Diego, estado Carabobo, Venezuela. *Rev la Soc Venez Microbiol* [Revista en Internet. [Acceso 10 de diciembre de 2015]; 24 (1–2):46–9. Disponible en: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-25562004000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- Pacheco Secades, V. Control de calidad (2020). Laboratorio Físicoquímico de Control de Calidad del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA).
- PNUMA. Programa Global de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente. (2007). Agua. Programa Mundial de

Evaluación de Recursos Hídricos WWAP, Canadá. [Consultado 21 de agosto de 2013].
Disponible en: <http://www.gemswater.org/>

- Robert Pullés, M., (2014). Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en Cuba. Revista CENIC. Ciencias Biológicas, 45(1), 25-36.
- Zamberlan, M.; Santana; Guilhermetti, M.; Camargo, I.; Harue, E.; Ueda-Nakamura, T.; Vataru, C.; Prado, B. (2008). Comparison of the bacteriological quality of tap water and bottled mineral water. International Journal of Hygiene and Environmental Health. 211 (5-6):504-509.

10. Anexo A. Fotografías



Fig. 1. Esterilización de materiales.



Fig. 2. Recipientes para recolección de muestras.

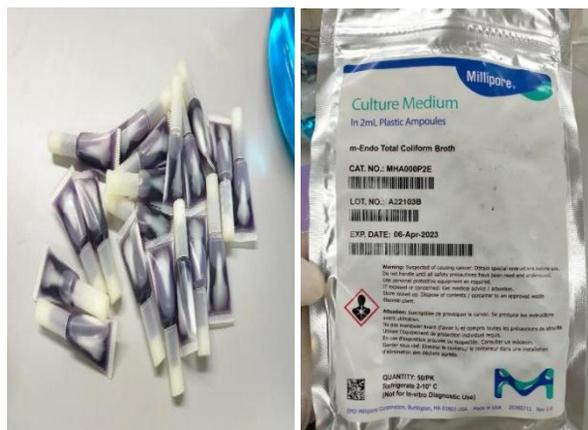


Fig. 3. Medios de cultivo.



Fig. 4. Medios de cultivos en cajas Petri para coliformes totales y fecales.



Fig. 5. Selección de muestras.



Fig. 6. Proceso de filtración de las muestras.



Fig. 7. Etiquetado de las muestras filtradas.



Fig. 8. Incubación de las cajas Petri.



Fig. 9. Conteo de colonias confirmadas.



Fig. 10. Blanco del análisis.



Fig. 11. UFC verde metálico.

11. Anexo B

ANOVA coliformes totales

- Muestreo 1

One Way Analysis of Variance

Data source: Data 1 in Notebook1

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0.811)

Equal Variance Test: Passed (P = 0.075)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Col 1	3	0	78.000	32.187	18.583
Col 2	3	0	10.000	2.646	1.528
Col 3	3	0	48.000	18.028	10.408

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	6968.000	3484.000	7.640	0.022
Residual	6	2736.000	456.000		
Total	8	9704.000			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0.022).

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.708

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0.050
Col 1 vs. Col 2	68.000	3	5.516	0.019	Yes
Col 1 vs. Col 3	30.000	3	2.433	0.273	No
Col 3 vs. Col 2	38.000	3	3.082	0.154	No

- **Muestreo 2**

One Way Analysis of Variance

Data source: Data 1 in Notebook1

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0.121)

Equal Variance Test:Passed (P = 0.064)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Col 2	11	5	75.500	22.394	9.142
Col 3	11	5	8.000	3.578	1.461
Col 4	11	5	28.000	24.771	10.113

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	14425.000	7212.500	19.184	<0.001
Residual	15	5639.500	375.967		
Total	17	20064.500			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = <0.001).

Power of performed test with alpha = 0.050: 1.000

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0.050
Col 2 vs. Col 3	67.500	3	8.527	<0.001	Yes
Col 2 vs. Col 4	47.500	3	6.001	0.002	Yes
Col 4 vs. Col 3	20.000	3	2.527	0.208	No

- **Muestreo 3**

One Way Analysis of Variance

Data source: Data 1 in Notebook1

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0.360)

Equal Variance Test: Passed (P = 0.656)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Col 9	3	0	184.667	15.275	8.819
Col 10	3	0	67.000	20.518	11.846
Col 11	3	0	147.000	55.462	32.021

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	21664.222	10832.111	8.711	0.017
Residual	6	7460.667	1243.444		
Total	8	29124.889			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0.017).

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.774

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0.050
Col 9 vs. Col 10	117.667	3	5.780	0.015	Yes
Col 9 vs. Col 11	37.667	3	1.850	0.442	No
Col 11 vs. Col 10	80.000	3	3.930	0.072	No

ANOVA coliformes fecales

- Muestreo 1

One Way Analysis of Variance

Data source: Data 1 in Notebook1

Normality Test (Shapiro-Wilk) Failed (P < 0.050)

Test execution ended by user request, ANOVA on Ranks begun

Kruskal-Wallis One Way Analysis of Variance on Ranks

Data source: Data 1 in Notebook1

Group	N	Missing	Median	25%	75%
Col 13	3	0	64.000	26.000	84.000
Col 14	3	0	0.000	0.000	0.000
Col 15	3	0	1.000	0.000	2.000

H = 6.764 with 2 degrees of freedom. P(est.)= 0.034 P(exact)= 0.011

The differences in the median values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0.011)

To isolate the group or groups that differ from the others use a multiple comparison procedure.

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparison	Diff of Ranks	q	P<0.05
Col 13 vs Col 14	16.500	3.479	Yes
Col 13 vs Col 15	10.500	2.214	No
Col 15 vs Col 14	6.000	1.265	No

Note: The multiple comparisons on ranks do not include an adjustment for ties.

- **Muestreo 2**

One Way Analysis of Variance

Data source: Data 1 in Notebook1

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0.483)

Equal Variance Test:Passed (P = 0.062)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Col 17	3	0	17.000	7.550	4.359
Col 18	3	0	1.000	1.732	1.000

Col 19	3	0	6.000	2.000	1.155
--------	---	---	-------	-------	-------

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	402.000	201.000	9.422	0.014
Residual	6	128.000	21.333		
Total	8	530.000			

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference (P = 0.014).

Power of performed test with alpha = 0.050: 0.810

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0.050
Col 17 vs. Col 18	16.000	3	6.000	0.013	Yes
Col 17 vs. Col 19	11.000	3	4.125	0.060	No
Col 19 vs. Col 18	5.000	3	1.875	0.433	No

- **Muestreo 3**

One Way Analysis of Variance

Data source: Data 1 in Notebook1

Normality Test (Shapiro-Wilk) Passed (P = 0.166)

Equal Variance Test: Passed (P = 0.513)

Group Name	N	Missing	Mean	Std Dev	SEM
Col 21	3	0	61.000	19.079	11.015
Col 22	3	0	23.000	4.000	2.309
Col 23	3	0	38.000	2.646	1.528

Source of Variation	DF	SS	MS	F	P
Between Groups	2	2198.000	1099.000	8.519	0.018
Residual	6	774.000	129.000		

Total 8 2972.000

The differences in the mean values among the treatment groups are greater than would be expected by chance; there is a statistically significant difference ($P = 0.018$).

Power of performed test with $\alpha = 0.050$: 0.763

All Pairwise Multiple Comparison Procedures (Tukey Test):

Comparisons for factor:

Comparison	Diff of Means	p	q	P	P<0.050
Col 21 vs. Col 22	38.000	3	5.795	0.015	Yes
Col 21 vs. Col 23	23.000	3	3.507	0.105	No
Col 23 vs. Col 22	15.000	3	2.287	0.310	No