



doi: 10.4321/s0465-546x2023000400002

Artículo original

Evaluación simplificada de riesgo biológico con R aplicado al proceso de tratamiento de aguas residuales

Simplified evaluation of biological risk with R applied to wastewater treatment process

Eric Morales-Mora^{1,2} 0000-0001-8090-4947

Andrei Badilla-Aguilar³ 0000-0002-1424-9689

Pablo Rivera-Navarro³ 0000-0003-0482-4202

Ernesto Alfaro-Arrieta³ 0000-0002-1317-446X

Kenia Barrantes-Jiménez¹ 0000-0002-2673-9220

Clemens Ruepert⁴ 0000-0001-5109-2222

Jennifer Crowe⁴ 0000-0002-0608-7157

Luz Chacón-Jiménez¹ 0000-0003-2506-0619

¹Instituto de Investigaciones en Salud, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

²Escuela de Tecnologías en Salud, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

³Laboratorio Nacional de Aguas (LNA), Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, Cartago, Costa Rica.

⁴Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET), Universidad Nacional de Costa Rica, Heredia, Costa Rica.

Correspondencia

Eric Morales-Mora
eric.morales@ucr.ac.cr

Recibido: 04.08.2023

Aceptado: 24.11.2023

Publicado: 29.12.2023

Contribuciones de autoría

Eric Morales-Mora, Andrei Badilla-Aguilar, Pablo Rivera-Navarro, Ernesto Alfaro-Arrieta, Kenia Barrantes-Jiménez, Jennifer Crowe y Luz Chacón-Jiménez: conceptualización y diseño de estudio. Eric Morales-Mora, Jennifer Crowe y Luz Chacón-Jiménez: análisis de datos y diseño de la evaluación de riesgos. Eric Morales-Mora: recopilación de información, programación y evaluación de riesgos. Eric Morales-Mora, Andrei Badilla-Aguilar, Pablo Rivera-Navarro, Ernesto Alfaro-Arrieta, Kenia Barrantes-Jiménez, Clemens Ruepert, y Luz Chacón-Jiménez: recolección y procesamiento de muestras. Todos los coautores: preparación y aprobación final del manuscrito.

Financiación

Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica y Laboratorio Nacional de Aguas del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

Conflicto de intereses

Los autores declaran la no existencia de conflicto de interés.

Agradecimientos

Se agradece a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por su apoyo al proyecto mediante el cual fue posible elaborar este manuscrito, al Programa de la Maestría en Salud Ocupacional con mención en Higiene Ambiental y al Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET) de la Universidad Nacional de Costa Rica por su apoyo durante el estudio.

Un agradecimiento especial a la M.Sc. María Gabriela Rodríguez Zamora y la Escuela de Ingeniería en Seguridad Laboral e Higiene Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica por la capacitación y préstamo del equipamiento para las mediciones de aire con el uso de borboteadores.

Cómo citar este trabajo

Morales-Mora E, Badilla-Aguilar A, Rivera-Navarro P, Alfaro-Arrieta E, Barrantes-Jiménez K, Ruepert C, Crowe J, Chacón-Jiménez L. Evaluación simplificada de riesgo biológico con R aplicado al proceso de tratamiento de aguas residuales. *Med Segur Trab (Internet)*. 2023;69(273):-242. doi: 10.4321/s0465-546x2023000400002

© BY-NC-SA 4.0

Resumen

Introducción: Existen trabajos laborales con alto nivel de riesgo biológico como la operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El objetivo de este estudio fue evaluar el nivel de riesgo biológico para los trabajadores de tres PTAR con diferente tamaño de cobertura y crear una herramienta en el lenguaje de programación R para facilitar la aplicación de la Evaluación Simplificada de Riesgo Biológico (ESRB), su visualización y reporte de resultados.

Métodos: Se aplicó una ESRB en tres PTAR de distinto tamaño y se recolectaron muestras de indicadores fecales (en aire y superficies) y de polvo inhalable en zonas de trabajo y operación. De forma paralela, se desarrolló una herramienta automatizada en R para analizar, visualizar y reportar los resultados de la ESRB.

Resultados: En todas las zonas de trabajo incluidas en el estudio se detectaron indicadores de contaminación fecal y concentraciones de polvo inhalable por encima del límite recomendado. La aplicación de la herramienta programada en R del ESRB mostró que las plantas medianas y pequeñas tienen un riesgo biológico “intolerable”, lo que implica la necesidad de tomar medidas correctivas inmediatas. Por otro lado, la planta grande exhibió un nivel de riesgo “intermedio”, recomendándose medidas preventivas a corto plazo.

Conclusión: Los resultados destacan la importancia de implementar medidas correctivas y preventivas en las plantas de tratamiento de aguas residuales. La herramienta automatizada en R permitió una evaluación de riesgo eficiente, precisa y rápida, facilitando la identificación de riesgos ocupacionales.

Palabras clave: Riesgo Biológico; Evaluación de Riesgo Biológico; Salud Laboral; Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales; Lenguaje de Programación R.

Abstract

Introduction: There are occupational jobs with a high level of biological risk, including operating and maintaining wastewater treatment plants. This study aimed to assess the level of biological risk for workers in three wastewater treatment plants with different sizes of coverage during the year 2021 and, additionally, to create a tool in the R programming language to facilitate the application of the simplified evaluation of biological risk (SEBR) method, its visualization and reporting of results.

Methods: An SEBR was conducted at three WWTPs of different sizes, and fecal indicators (airborne and surface) and inhalable dust samples were collected in work and operational areas. In parallel, an automated tool was developed in R to analyze, visualize, and report the SEBR results.

Results: Indicators of fecal pollution and inhalable dust concentrations above the recommended limit were detected in all work areas included in the study. Applying the SEBR R-programmed tool showed that the medium and small plants have an “intolerable” biohazard, implying the need for immediate corrective action. On the other hand, the large plant exhibited an “intermediate” level of risk, recommending short-term preventive measures.

Conclusion: The results highlight the importance of implementing corrective and preventive measures in wastewater treatment plants. The automated tool in R allowed for an efficient, accurate, and rapid risk assessment, facilitating the identification of occupational risks.

Keywords: Biohazard; Biohazard Assessment; Occupational Health; Wastewater Treatment Plants; R Programming Language.

Introducción

Los agentes biológicos, como microorganismos patógenos, material biogénico y residuos anatomopatológicos, son comunes en ambientes laborales tales como plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), centros de salud y centros de manufactura de alimentos^(1,2). La pandemia de COVID-19 ha aumentado la atención en la evaluación y control de riesgos biológicos en el trabajo^(3,4). Sin embargo, los desafíos en su evaluación y difusión de información en la salud laboral siguen presentes debido a la naturaleza estocástica de los procesos de salud-enfermedad y la distribución de los agentes biológicos en el ambiente^(5,6).

Existen múltiples ocupaciones que presentan exposición a agentes biológicos tales como: atención en salud, procesamiento de alimentos de origen animal, crianza de animales, recolección de residuos sólidos y tratamiento de aguas residuales⁽⁷⁻¹⁴⁾. Entre estas, la operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento de aguas residuales es particularmente riesgosa debido a la producción y dispersión de aerosoles con altas cargas de microorganismos patógenos en el proceso de tratamiento⁽¹⁵⁾. Las personas trabajadoras en las PTAR pueden exponerse a aerosoles o superficies potencialmente contaminadas^(16,17).

En las PTAR, labores que implican contacto directo con las aguas residuales como mantenimiento, reparación de maquinaria y/o limpieza aumentan la exposición a patógenos, más allá de la inhalación e ingestión accidental de aerosoles^(6,15). Además, variables en el espacio laboral como la infraestructura, conductas laborales, políticas administrativas y uso de equipos de protección personal (EPP) pueden modificar la exposición a agentes biológicos^(5,18,19). Algunas soluciones efectivas para disminuir la exposición son el aislamiento de las fuentes de contaminación, soluciones tecnológicas y uso de EPP, pero su implementación en las PTAR no siempre es adecuada^(20,21).

La evaluación del riesgo biológico en espacios laborales como las PTAR es importante para identificar potenciales puntos de control y prevención⁽²²⁾. La metodología de evaluación simplificada de riesgo biológico (ESRB) es una opción rápida y sencilla para estimar la exposición a agentes biológicos y valorar la gravedad de los potenciales daños⁽²³⁾. Incluye factores como vía de transmisión, vacunación, periodo de exposición y medidas higiénicas⁽²⁴⁾. Estos factores son evaluados conjuntamente para obtener un nivel de riesgo global, por lo cual, es adecuada en situaciones donde se requiere una evaluación exploratoria rápida⁽⁵⁾. En particular, los procesos de tratamiento de aguas residuales requieren un alto grado de trabajo manual, lo que puede propiciar la ingestión accidental de aguas residuales⁽¹⁾.

Por otro lado, la automatización de las evaluaciones e informes en salud laboral puede resultar muy beneficiosa, puesto que optimiza el tiempo de análisis al procesar y visualizar rápidamente los datos recolectados, aumentando la eficiencia y reduciendo la posibilidad de errores humanos⁽²⁵⁾. Además, una herramienta de evaluación automatizada permite una monitorización más efectiva y consistente de los factores de riesgo ocupacionales en el ambiente laboral⁽²⁶⁾. Lo cual permite la implementación

de medidas correctivas o preventivas necesarias a corto plazo, facilitando la comparación de resultados y protección de las personas trabajadoras⁽²⁷⁾.

En consideración de ello, se aplicó una ESRB en tres PTAR con diferentes tamaños de cobertura, al ser una herramienta apropiada y automatizable. Los tres PTAR variaban en sus procesos de tratamiento y las prácticas laborales, permitiendo así probar la metodología de la ESRB en el contexto costarricense, donde no existen evaluaciones previas de riesgos biológicos ocupacionales para las personas que laboran en estas.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el nivel de riesgo biológico para los trabajadores de tres PTAR con diferente tamaño de cobertura durante el año 2021. De forma paralela, se tuvo como objetivo crear una herramienta en el lenguaje de programación R para facilitar la aplicación de la ESRB junto con la visualización y reporte de los resultados obtenidos.

Métodos

Sitio de estudio

Este estudio se realizó en tres PTAR ubicadas en las regiones Central y Pacífico Central de Costa Rica con diferentes tamaños de cobertura: grande (153.000 hab.), media (11.172 hab.), y pequeña (725 hab.). La planta pequeña y la mediana aplican tratamiento primario y secundario, mientras que la grande únicamente aplica tratamiento primario. El tratamiento primario implica la separación física de sólidos del caudal de aguas residuales, mientras que el tratamiento secundario consiste en degradación biológica por medio de lodos activados⁽²⁸⁾.

Identificación de peligros biológicos

Se realizó una ESRB en cada una de las tres PTAR utilizando la metodología propuesta por Llorca et al; 2013 & 2018^(5,29), que consiste en la clasificación del riesgo biológico según las cualidades de la exposición: 1) Tipo de agente (en este estudio infecciones causadas por virus y parásitos entéricos), 2) Clasificación del daño potencial (D), 3) Vía de transmisión (T), 4) Tasa de incidencia de enfermedad gastrointestinal aguda donde se ubican las PTAR (I), 5) Vacunación de las personas trabajadoras contra el tipo de agente (en el caso de los agentes evaluados no hay vacunación, lo cual implica el mayor puntaje en este rubro) (V), 6) Frecuencia de realización de tareas de riesgo (F), y 7) Medidas higiénicas implementadas (H). Cabe mencionar que en el presente caso se omitió el grupo aplicable (G) de la metodología de Llorca et al; 2018, puesto que en el contexto los patógenos seleccionados, virus y parásitos entéricos, se considera más pertinente el ajuste del daño potencial por la vacunación, sobre la suma de grupo del agente menos la vacunación, la cual no existe para este grupo de patógenos⁽⁵⁾. El nivel de riesgo biológico semicuantitativo (R) se clasificó mediante la aplicación de la siguiente fórmula propuesta en Llorca et al (2013)⁽²⁹⁾:

Para las medidas higiénicas (H), a diferencia de las demás variables, se aplicó una lista de revisión, donde se asignó un valor en función del porcentaje de respuestas positivas (RP) (cumplimiento) y respuestas negativas (RN) (no cumplimiento) en el proceso de trabajo. El porcentaje de cumplimiento (PRP) descarta los rubros que no aplicaron. Su cálculo se realizó de la siguiente manera:

Según el PRP de la lista de revisión se asignó una puntuación a H, siendo: $< 50\% = 0$, $50 - 79\% = -1$, $80 - 95\% = -2$ y $> 95\% = -3$. Una vez obtenida el valor H, se procede a la estimación del riesgo biológico semicuantitativo (R) por infecciones causadas por virus y parásitos entéricos, la cual, se categoriza de la siguiente manera según su puntaje obtenido: “Aceptable” ($8 \leq 12$); “Requiere aplicación de medidas preventivas” ($> 12 - 17$); y “Riesgo intolerable - acciones correctivas inmediatas” (> 17)⁽²⁹⁾.

Medición de indicadores fecales y polvo inhalable

En cada PTAR, se colectó dos muestras de aire y dos muestras de superficies: una en la zona de trabajo (espacio de aireadores y maquinaria) y otra en la zona de operación (espacio de oficinas y monitoreo de la PTAR). Las muestras fueron colectadas durante 30 min en la jornada laboral diurna, entre las 6:00

a.m. y 12:00 p.m. El muestreo de indicadores fecales en el aire se realizó mediante la succión de aire exterior hacia un borboteador con 10 mL de solución amortiguadora (agua peptonada estéril con un pH 7,2). El aire succionado fluyó a través de la solución, promoviendo la retención de las partículas en el líquido^(30,31). Para la succión se utilizó una bomba de succión marca SKC AirChek Touch modelo 220-5000TC con un flujo de 3 L/min.

Simultáneamente, se realizó un muestreo de indicadores fecales en superficies, donde se colocó una plantilla de metal con un área interna de 25 cm². Seguidamente, un hisopo estéril humedecido en solución amortiguadora se pasó por el área interna de la plantilla, a fin de recoger cualquier microorganismo que pudiera estar presente en la superficie, después de este proceso el hisopo se agitó en el tubo de solución amortiguadora, proceso que se repitió tres veces. Al final, el hisopo junto con el amortiguador fueron transportados al laboratorio para su posterior análisis^(32,33).

Las muestras se almacenaron a 4 °C y se transportaron al laboratorio para su análisis en un periodo máximo de 24 h. Para el análisis de las muestras se utilizó la técnica de plaqueo por esparcido, donde se determinó la presencia o ausencia de coliformes fecales (CF) y *Escherichia coli*⁽³²⁾.

El muestreo de polvo inhalable se realizó en los mismos puntos utilizados para los indicadores fecales en aire. Para su medición se utilizó el método general de muestreo y análisis gravimétrico de aerosoles respirables, torácicos e inhalables de la Agencia Ejecutiva para la Salud y Seguridad del Reino Unido⁽³⁴⁾. El muestreo y análisis se realizó según lo descrito por el Instituto de Medicina Ocupacional del Reino Unido con filtros de cloruro de polivinilo con 25 mm de diámetro y un tamaño de poro de 5 µm marca Whatman®, instalados en una bomba de muestreo personal con un flujo de 3 L/min de manera uniforme durante las 6 h de jornada laboral diurna, entre las 6:00 a.m. y 12:00 p.m. Las cabezas de muestreo con los filtros instalados fueron pesadas antes y después del muestreo, la masa de polvo inhalable fue definida por la diferencia entre estas mediciones con el método descrito⁽³⁴⁾.

Programación de herramienta y análisis de datos

El análisis y visualización de datos de la ESRB fueron llevados a cabo mediante la programación de un archivo formato Markdown con el lenguaje de programación R (<https://cran.r-project.org/>) (Figura 1). De esta manera, fue posible la generación de informes automatizados y reproducibles. La entrada para las funciones fueron los datos recolectados en campo con el instrumento de la ESRB⁽⁵⁾. La herramienta realiza el filtrado (selección de datos por categoría) y compresión (reducción de múltiples variables en una única variable) de datos y devuelve el cálculo del puntaje del nivel de riesgo biológico semicuantitativo, la categorización de riesgo y gráficos de mosaico de las medidas higiénicas observadas por tipo de control: administrativo, infraestructura y EPP. La herramienta, una base de datos aleatoria para prueba y el README del cuaderno se encuentran disponibles de manera abierta en: https://github.com/ericmoralesmora/git_biorisk.

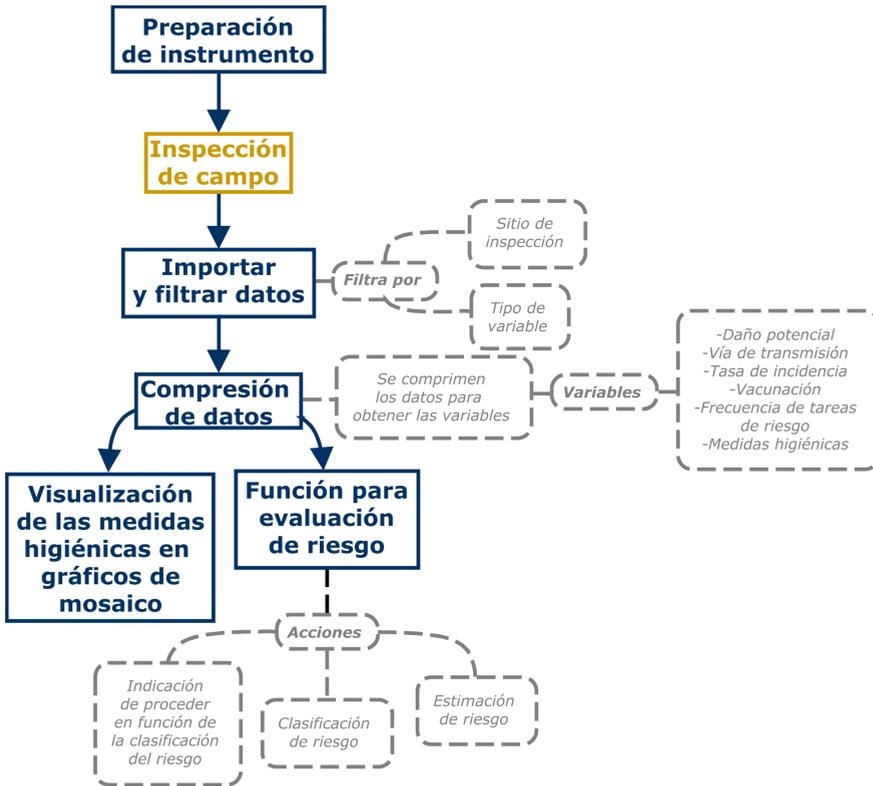


Figura 1. Diagrama de flujo para la aplicación de la evaluación simplificada de riesgo biológico automatizado con el lenguaje de programación R y con la herramienta de Markdown. Azul (flujo de la herramienta analítica), amarillo (inspección de campo), gris (generalidades de la herramienta analítica).

Resultados

Todas las PTAR evaluadas presentaron niveles de riesgo inaceptables, sin embargo, la grande presentó un menor riesgo en comparación con la media y pequeña (Tabla 1). Este se debe, principalmente a factores como la transmisión aérea y por superficies, generación de aerosoles, alta frecuencia de actividades en áreas de generación de aerosoles y la falta de vacunas para virus y parásitos entéricos, lo cual implica el máximo puntaje de riesgo para este rubro. En cuanto a la generación de aerosoles, se detectaron indicadores fecales (CF y *E. coli*) en las zonas de trabajo y operación en las PTAR en aire y superficies, con excepción de *E. coli* que no se encontró en el aire (Tabla 1). Adicionalmente, las zonas de trabajo (aireadores y maquinaria) de las tres PTAR presentaron concentraciones de polvo inhalable por encima de los límites laborales recomendados, particularmente notable en la PTAR grande. Por su parte, las áreas de operación (oficinas) se mantuvieron dentro de los límites aceptables de 4 mg/m⁽³⁾ (valor umbral promedio ponderado en el tiempo - TLV-TWA -, por sus siglas en inglés).

Tabla 1. Descripción del riesgo e indicadores de contaminación fecal y química en el ambiente de trabajo de las plantas de tratamiento de aguas residuales.

Variable	PTAR	Valor	Interpretación
Evaluación simplificada de riesgo biológico			
Nivel de riesgo biológico semi-cuantitativo	Grande	17	Requiere medidas preventivas a corto plazo
	Media	18	Requiere acciones correctivas inmediatas
	Pequeña	18	Requiere acciones correctivas inmediatas
Indicadores fecales en aire			
Coliformes fecales en la zona de trabajo	Grande	Positivo	Presencia de coliformes fecales en el aire
	Media	Positivo	Presencia de coliformes fecales en el aire
	Pequeña	Negativo	Ausencia de coliformes fecales en aire
Coliformes fecales en la zona de operaciones	Grande	Positivo	Presencia de coliformes fecales en el aire
	Media	Negativo	Ausencia de coliformes fecales en aire
	Pequeña	Positivo	Presencia de coliformes fecales en el aire
<i>Escherichia coli</i> en la zona de trabajo	Grande	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en aire
	Media	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en aire
	Pequeña	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en aire
<i>E. coli</i> en la zona de operaciones	Grande	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en aire
	Media	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en aire
	Pequeña	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en aire
Indicadores fecales en superficies			
Coliformes fecales en la zona de trabajo	Grande	Positivo	Presencia de coliformes fecales en las superficies
	Media	Negativo	Ausencia de coliformes fecales en superficies
	Pequeña	Positivo	Presencia de coliformes fecales en las superficies
Coliformes fecales en la zona de operaciones	Grande	Positivo	Presencia de coliformes fecales en las superficies
	Media	Negativo	Ausencia de coliformes fecales en superficies
	Pequeña	Positivo	Presencia de coliformes fecales en las superficies
<i>E. coli</i> en la zona de trabajo	Grande	Positivo	Presencia de <i>E. coli</i> las superficies
	Media	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en superficies
	Pequeña	Positivo	Presencia de <i>E. coli</i> las superficies
<i>E. coli</i> en la zona de operaciones	Grande	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en superficies
	Media	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en superficies
	Pequeña	Negativo	Ausencia de <i>E. coli</i> en superficies

Variable	PTAR	Valor	Interpretación
Polvo inhalable en aire			
Polvo inhalable en la zona de trabajo	Grande	16,83 mg/m³	Supera el TLV-TWA
	Media	8,89 mg/m³	Supera el TLV-TWA
	Pequeña	7,18 mg/m³	Supera el TLV-TWA
Polvo inhalable en la zona de operaciones	Grande	-0,02 mg/m ³	No supera el TLV-TWA
	Media	2,43 mg/m ³	No supera el TLV-TWA
	Pequeña	-0,08 mg/m ³	No supera el TLV-TWA

Evaluación medidas higiénicas administrativas

Se observó el mayor cumplimiento en la PTAR grande (91,7%). Sin embargo, se encontraron incumplimientos en la limpieza de ropa de trabajo tras la jornada y protección de personal sensible (Figura 2). En las PTAR de escala media y pequeña se detectaron que no se cumple con los comportamientos o medidas recomendadas, en transporte de muestras, medidas preventivas (consumo de cigarrillo, alimentos o bebidas), procedimientos de higiene, información y comunicación de riesgos relacionados a agentes biológicos. El cumplimiento general fue de 58,3% en la planta media y 54,2% en la pequeña.

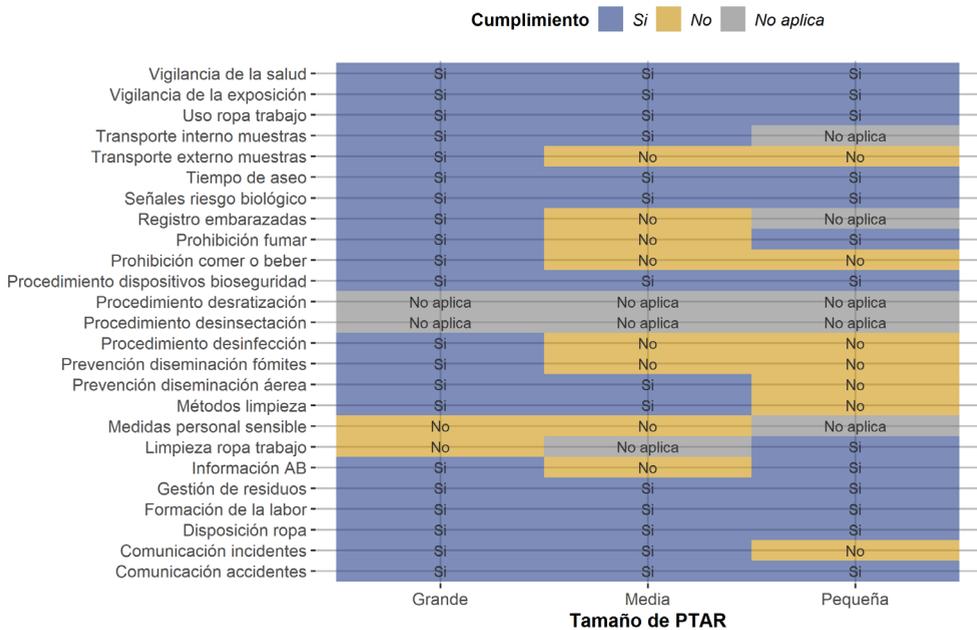


Figura 2. Cumplimiento de medidas higiénicas administrativas en las tres plantas de tratamiento de aguas residuales en estudio según la aplicación de evaluación simplificada de riesgo biológico.

Evaluación medidas higiénicas infraestructura

Se presentaron diferentes niveles de cumplimiento entre las tres PTAR. La planta grande tuvo el mayor cumplimiento (88,9%), seguida de la media (55,6%) y la pequeña (44,4%). Todas incumplieron aspectos como el uso de equipos de bioseguridad, limpieza de áreas de trabajo y monitoreo de contaminación biológica (Figura 3). La planta media carece de duchas de seguridad, mientras que la pequeña

no tiene dispositivos de seguridad para emergencias ni infraestructura para limpieza y desinfección. Solo la planta grande cuenta con sistemas de ventilación, puesto que las otras dos se encuentran al aire libre.

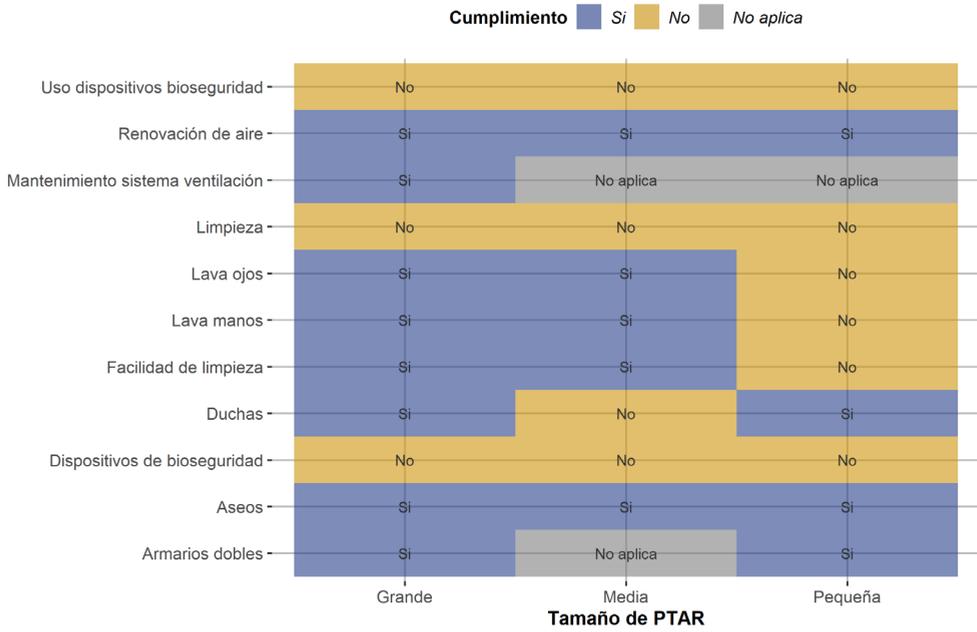


Figura 3. Cumplimiento de medidas higiénicas en la infraestructura en las tres plantas de tratamiento de aguas residuales en estudio según la aplicación de evaluación simplificada de riesgo biológico.

Evaluación medidas higiénicas EPP

El mayor cumplimiento se observó en las PTAR grande y media (80%), y el menor en la PTAR pequeña (50%) (Figura 4). La PTAR grande mostró un incumplimiento general en la limpieza y monitoreo de EPP por parte del empleador. En las PTAR mediana y pequeña, no se evidenció el uso de EPP durante actividades de alto riesgo que involucran exposición a aguas residuales. Adicionalmente, en la PTAR pequeña no se observó monitoreo de EPP y ni cambio de ropa de los trabajadores al finalizar la jornada.

En general, las medidas administrativas, de infraestructura y EPP se cumplieron parcialmente en las tres PTAR, con el mayor cumplimiento en la PTAR grande y el menor en la PTAR pequeña. Los principales ámbitos para mejorar se encontraron en los controles administrativos e infraestructurales, que son prioridades antes de implementar el uso de EPP.

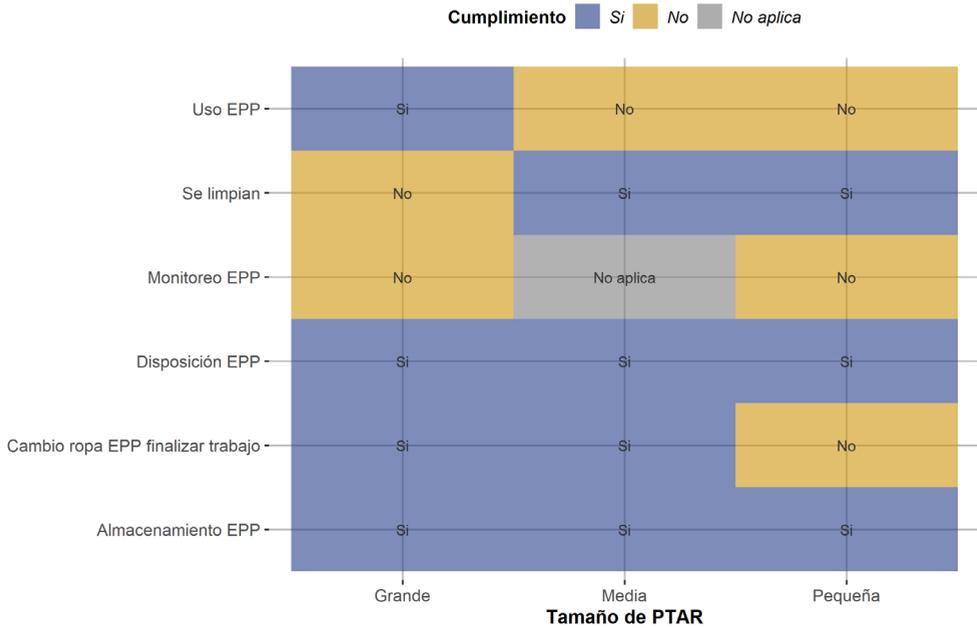


Figura 4. Cumplimiento de medidas higiénicas en el uso de equipo de protección personal en las tres plantas de tratamiento de aguas residuales en estudio según la aplicación de evaluación simplificada de riesgo biológico.

Discusión

Los resultados de la ESRB mostraron que el riesgo biológico en las tres PTAR estudiadas fue clasificada como inaceptable, por lo tanto, se requieren medidas correctivas y preventivas para reducirlo. Adicionalmente, se constató este riesgo biológico con la presencia de indicadores fecales en aire y superficies, confirmando la existencia de contaminación biológica en los espacios de trabajo (Tabla 1). De manera inespecífica, fue posible observar altas concentraciones de polvo inhalable en las zonas de trabajo, relacionado con la alta presencia de aerosoles producidos en el tratamiento de aguas residuales.

Complementariamente, la documentación de las medidas higiénicas en cada PTAR mostró que los controles administrativos e infraestructurales tienen el menor grado de cumplimiento en las plantas pequeña y mediana (Tabla 1 y Figuras. 2, 3 y 4). Esto no corresponde a la jerarquía ideal de medidas de control, que van desde la más deseable a la menos deseable: eliminación, sustitución, soluciones tecnológicas, soluciones administrativas y uso de EPP⁽²¹⁾. En este caso, la eliminación o sustitución de la fuente del agente no es posible, ya que el objetivo final del proceso laboral es el tratamiento de las aguas residuales, que es el principal insumo y peligro de trabajo. Por lo tanto, las dos medidas recomendadas y con mayor oportunidad de mejora son las soluciones tecnológicas en la infraestructura o la aplicación de medidas administrativas directamente. Los factores administrativos, como los procedimientos de prevención y limpieza del ambiente de trabajo y la modificación de conductas, tienen un gran potencial de mejora en las tres PTAR (Figura 2).

En cuanto a las medidas higiénicas de infraestructura en las PTAR, se observaron deficiencias en el uso de dispositivos de bioseguridad, limpieza y sistemas de respuesta a accidentes, principalmente en las plantas medianas y pequeñas (Figura 3). A pesar de esto, la presencia de indicadores fecales en el aire y las superficies en las zonas de trabajo y operaciones requieren medidas alternativas para la contención y aislamiento de las fuentes de contaminación microbiológica (Figura 3). Las medidas comunes para

la contención de bioaerosoles incluyen la luz ultravioleta para la desinfección, inactivación térmica, radiación de microondas, ventilación forzada, filtración de aire o aislamiento de la fuente (aguas residuales)⁽²⁰⁾.

A pesar de la implementación de medidas de control administrativo e infraestructura, la naturaleza del peligro biológico requiere el uso EPP, ya que la posibilidad de contacto directo con aguas residuales es alta, especialmente en tareas de riesgo como el mantenimiento y operación⁽¹⁹⁾. En este sentido, se detectó el uso discontinuo o no uso de EPP en las PTAR, junto con un deficiente mantenimiento y monitoreo de su funcionamiento (Figura 4).

La aplicación de estrategias de evaluación del riesgo biológico en ambientes laborales permite reconocer potenciales fuentes para la mejora y aplicación de la técnica en otros contextos con alto riesgo biológico con el fin de evitar y prevenir la exposición⁽²⁵⁾. Sumado a ello, la automatización en la evaluación del riesgo biológico ocupacional por medio de visualizaciones y reportes automáticos incrementa su eficiencia dado que le enriquece en términos de análisis y detección temprana de cambios en los niveles de riesgo⁽²⁵⁾. Esta mejora es crucial para la comparación de datos efectiva a lo largo del tiempo y entre instalaciones. Al contar con una plataforma común de reportes y análisis estas comparaciones se facilitan sustancialmente y disminuyen la subjetividad de la interpretación de resultados^(26,27).

La ESRB es una técnica útil para realizar una evaluación exploratoria rápida del riesgo biológico que permita la valoración de análisis y mediciones de mayor complejidad. Sin embargo, puede presentar limitaciones para la proyección del impacto de medidas preventivas y correctivas⁽²⁴⁾. Por otro lado, identifica la presencia de medidas higiénicas con potencial de mejora de manera sencilla. Finalmente, la aplicación de técnicas para la evaluación de peligros y riesgos biológicos resulta relevante, puesto que previo a la pandemia por SARS-CoV-2, la evaluación de riesgo biológico en espacios ocupacionales tenía un alcance limitado e incluido en las evaluaciones tradicionales de peligros debidos a sustancias químicas tóxicas y especiales.

La ESRB ofrece una útil y rápida evaluación del riesgo biológico para la identificación de mejoras higiénicas⁽²⁴⁾. Además, puntualiza de manera sencilla acciones correctivas a realizar y actualmente su relevancia ha crecido debido a la pandemia por SARS-CoV-2. Su complementariedad con herramientas como R y Markdown, mejora sustancialmente su aplicabilidad y reproducibilidad al facilitar su aplicación, análisis y comunicación de resultados. Consecuentemente, es recomendable su uso extendido por evaluadores de riesgo en espacios laborales con alto potencial de presentar agentes biológicos.

Limitaciones

Aunque la ESRB proporciona una rápida evaluación del riesgo biológico en ambientes laborales, puede tener limitaciones para proyectar el impacto a largo plazo de las medidas preventivas y correctivas. Adicionalmente, la investigación se centró en plantas de tratamiento de aguas residuales específicas, clasificadas por su escala, lo que puede limitar la generalización de los resultados. Finalmente, la eficiencia de la automatización de la evaluación de riesgos mediante R depende del nivel de habilidad y experiencia del usuario con este lenguaje de programación, aun cuando el archivo Markdown provee el código listo para ejecutar, su modificación para adaptarlo a cada contexto requiere al menos de un conocimiento básico en el lenguaje de programación.

Conclusiones

Este estudio reveló un riesgo biológico inaceptable en las plantas de tratamiento de aguas residuales evaluadas, que amerita urgentes de medidas correctivas. Por otro lado, la automatización de la evaluación mediante el lenguaje de programación R mostró ser eficaz para la detección temprana de riesgos, la identificación de posibles mejoras, reproducibilidad coherente de la evaluación y disminución de periodo de evaluación, resaltando su relevancia en la gestión de riesgos biológicos ocupacionales.

Bibliografía

1. Corrao CRN, Mazzotta A, La Torre G, De Giusti M. Biological risk and occupational Health. *Ind Health*. 2012;50(4):326–37.

2. Viegas C, Viegas S, Quintal A, Täubel M, Sabino R. Exposure to Microbiological Agents in Indoor and Occupational Environments. Vol. 148. Switzerland: Springer International Publishing; 2017. 148–162 p.
3. Brisolara KF, Maal-Bared R, Sobsey MD, Reimers RS, Rubin A, Bastian RK, et al. Assessing and Managing SARS-CoV-2 Occupational Health Risk to Workers Handling Residuals and Biosolids. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;774:145732. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145732>
4. Zaneti RN, Girardi V, Spilki FR, Mena K, Westphalen APC, da Costa Colares ER, et al. Quantitative microbial risk assessment of SARS-CoV-2 for workers in wastewater treatment plants. *Sci Total Environ* [Internet]. 2021;754:142163. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142163>
5. Llorca RJL, Soto FP, Benavent NS. Manual práctico para la evaluación del riesgo biológico en actividades laborales diversas [Internet]. Llorca RJL, editor. Biogaval-Neo. Valencia, España: Centro Territorial de Valencia del INVASSAT; 2018. 44 p. Available from: https://invassat.gva.es/documents/161660384/161741765/Biogaval_neo_2018_cs/ea1b4c14-8033-4c8b-8779-c9efe5db45ac
6. Yan C, Leng Y li, Wu J ting. Quantitative microbial risk assessment for occupational health of temporary entrants and staffs equipped with various grade PPE and exposed to microbial bioaerosols in two WWTPs. *Int Arch Occup Environ Health* [Internet]. 2021;94(6):1327–43. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00420-021-01663-5>
7. Wu JY, Lau EHY, Lu ML, Guo C, Guo ZM, Yuan J, et al. An occupational risk of hepatitis E virus infection in the workers along the meat supply chains in Guangzhou, China. *One Heal* [Internet]. 2022;14(2022):100376. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2022.100376>
8. Deepnarain N, Nasr M, Amoah ID, Enitan-Folami AM, Reddy P, Stenström TA, et al. Impact of sludge bulking on receiving environment using quantitative microbial risk assessment (QMRA)-based management for full-scale wastewater treatment plants. *J Environ Manage*. 2020;267(December 2019).
9. Amoah ID, Kumari S, Bux F. A probabilistic assessment of microbial infection risks due to occupational exposure to wastewater in a conventional activated sludge wastewater treatment plant. *Sci Total Environ* [Internet]. 2022;843(March):156849. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156849>
10. Bianchi FP, Vimercati L, Mansi F, De Nitto S, Stefanizzi P, Rizzo LA, et al. Compliance with immunization and a biological risk assessment of health care workers as part of an occupational health surveillance program: The experience of a university hospital in southern Italy. *Am J Infect Control* [Internet]. 2020;48(4):368–74. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2019.09.024>
11. González Acevedo R, Cádua Rojas E. Exposición y control del riesgo biológico en el personal de enfermería de la Clínica de Urgencias de Bucaramanga. *Boletín Virtual*. 2018;7–5(23).
12. Uhrbrand K, Schultz AC, Koivisto AJ, Nielsen U, Madsen AM. Assessment of airborne bacteria and noroviruses in air emission from a new highly-advanced hospital wastewater treatment plant. *Water Res* [Internet]. 2017;112:110–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.01.046>
13. Rachiotis G, Tsovili E, Papagiannis D, Markaki A, Hadjichristodoulou C. Are municipal solid waste collectors at increased risk of Hepatitis A Virus infection? A Greek cross-sectional study. *Infez Med*. 2016;24(4):299–303.
14. Corrao CRN, Del Cimmuto A, Marzuillo C, Paparo E, La Torre G. Association between waste management and HBV among solid municipal waste workers: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *Sci World J*. 2013;2013.
15. WHO. Sanitation safety planning manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta [Internet]. 1st ed. Switzerland: World Health Organization; 2016. 156 p. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/171753>
16. Teixeira J V., Miranda S, Monteiro RAR, Lopes FVS, Madureira J, Silva G V., et al. Assessment of indoor airborne contamination in a wastewater treatment plant. *Environ Monit Assess*. 2013;185(1):59–72.

17. Carducci A, Donzelli G, Cioni L, Federigi I, Lombardi R, Verani M. Quantitative microbial risk assessment for workers exposed to bioaerosol in wastewater treatment plants aimed at the choice and setup of safety measures. *Int J Environ Res Public Health*. 2018;15(7).
18. CDC. Guidance for Reducing Health Risks to Workers Handling Human Waste or Sewage [Internet]. Sanitation & Hygiene. 2023. Available from: https://www.cdc.gov/healthywater/global/sanitation/workers_handlingwaste.html
19. Rim KT, Lim CH. Biologically hazardous agents at work and efforts to protect workers' health: A review of recent reports. *Saf Health Work* [Internet]. 2014;5(2):43–52. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.shaw.2014.03.006>
20. Singh NK, Sanghvi G, Yadav M, Padhiyar H, Thanki A. A state-of-the-art review on WWTP associated bioaerosols: Microbial diversity, potential emission stages, dispersion factors, and control strategies. *J Hazard Mater* [Internet]. 2021;410(2021):1–15. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124686>
21. Cherrie JW. Assessing the effectiveness of control. In: *Monitoring for Health Hazards at Work*. 2010.
22. Hernández Calleja A. Agentes biológicos. Evaluación simplificada. *Inst Nac Segur e Hig en el Trab* [Internet]. 2009;1–6. Available from: https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTécnicas/NTP/Ficheros/821a921/833_web.pdf http://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTécnicas/NTP/Ficheros/821a921/833_web.pdf
23. Comisiones Obreras de Madrid. Método y análisis en la Evaluación del Riesgo Biológico [Internet]. Madrid, España: SECRETARÍA DE SALUD LABORAL DE CCOO DE MADRID; 2020. Available from: http://www.saludlaboralmadrid.es/guia_riesgos_biologicos.pdf
24. Contreras Velásquez Z, Ramirez Leal P. Comparación de métodos utilizados en la valoración del riesgo biológico. *Rev la Asoc Española Espec en Med en el Trab*. 2019;28(2):91–108.
25. Yang L, Lu K, Díaz-Olivares JA, Seoane F, Lindecrantz K, Forsman M, et al. Towards Smart Work Clothing for Automatic Risk Assessment of Physical Workload. *IEEE Access*. 2018;6:40059–72.
26. Leso V, Fontana L, Iavicoli I. The occupational health and safety dimension of Industry 4.0. *Med Lav*. 2018;110(5):327–38.
27. Sau A, Bhakta I. Screening of anxiety and depression among the seafarers using machine learning technology. *Informatics Med Unlocked* [Internet]. 2019;16(December 2018). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.imu.2018.12.004>
28. Gerba CP, Pepper IL. Municipal Wastewater Treatment. In: *Environmental and Pollution Science* [Internet]. 3rd ed. Elsevier Inc.; 2019. p. 583–606. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00022-7>
29. Llorca Rubio JL, Soto Ferrando P, Laborda Grima R, Benavent Nacher S. Manual práctico para la evaluación del riesgo biológico en actividades laborales diversas. España: INVASSAT; 2013.
30. Chinivasagam HN, Blackall PJ. Investigation and application of methods for enumerating heterotrophs and *Escherichia coli* in the air within piggery sheds. *J Appl Microbiol*. 2005;98(5):1137–45.
31. Galán Madruga D, Ruíz Boada F, Díaz López G. Metodología para la toma de muestra de microorganismos altamente patógenos en las matrices ambientales aire, agua y suelo/sedimento [Internet]. España: Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología de la Nación; 2018. Available from: <http://publicaciones.isciii.es>
32. Baird R, Eaton A, Rice E, Bridgewater L. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Bair R, Eaton A, Rice E, Bridgewater L, editors. Washington, D.C: American Public Health Association (APHA); 2017. 9(89)-9(96).
33. Salfinger Y, Tortorello M. Compendium of methods for the microbiological examination of foods. 15th. APHA (DEX-252); 2015.

- 34.** HSE. General methods for sampling and gravimetric analysis of respirable, thoracic and inhalable aerosols MDHS14. 2019;1–13. Available from: <http://www.hse.gov.uk/pubns/mdhs/pdfs/mdhs14-4.pdf>
- 35.** Lara Icaza JD. Caracterización del riesgo biológico por accidentes laborales en el personal de salud de un centro ambulatorio en Guayaquil-Ecuador. *Rev Colomb Salud Ocup.* 2020;9(1):6073.