

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE POSGRADO**



**ESCUELA DE  
POSGRADO  
UTEC**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VIGILANCIA ESPACIO-  
TEMPORAL DE LA COVID-19 A TRAVÉS DEL MONITOREO DE  
SARS-CoV-2 EN LAS AGUAS RESIDUALES DE ZONAS URBANAS  
DE LIMA, CALLAO Y AREQUIPA, EN PERÚ.**

**TESIS**

Para optar el grado de Maestro en Ingeniería Civil

**AUTOR(ES)**

Braulio Pardo Figueroa Dianderas (ORCID: 0000-0001-7555-7610)

**ASESOR(ES)**

Mónica Cecilia Santa-María Fuster (ORCID: 0000-0003-4789-7444)

Lima – Perú

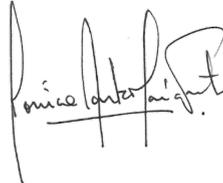
2022

## DECLARACIÓN JURADA

Yo, Mónica Cecilia Santa María Fuster identificada con DNI No 18226712 en mi condición de autoridad responsable de validar la autenticidad de los trabajos de investigación y tesis de la UNIVERSIDAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA, DECLARO BAJO JURAMENTO:

Que la tesis denominada “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE VIGILANCIA ESPACIO-TEMPORAL DE LA COVID-19 A TRAVÉS DEL MONITOREO DE SARS-CoV-2 EN LAS AGUAS RESIDUALES DE ZONAS URBANAS DE LIMA, CALLAO Y AREQUIPA, EN PERÚ.” ha sido elaborada por el señor Braulio Pardo Figueroa Dianderas, con la asesoría de Mónica Cecilia Santa María Fuster, identificada con el DNI N°18226712 , y que se presenta para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil, ha sido sometida a los mecanismos de control y sanciones anti plagio previstos en la normativa interna de la universidad, encontrándose un porcentaje de similitud de 0%.

En fe de lo cual firmo la presente.



Dra. Mónica Santa María Fuster  
Directora de Investigación

En Barranco, el 6 de febrero de 2023

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>0</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>1</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## **DEDICATORIA**

A Carmen, Franco, Alexia, Sebastián y José, por forjar y acompañarme siempre en el camino que he decidido seguir.



# ESCUELA DE POSGRADO UTEC

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a toda mi familia por su apoyo incondicional. A mi Asesora, la Dra. Mónica Santa-María, por su acompañamiento, consejos, enseñanzas, dedicación y paciencia a lo largo de estos dos años. A todo el equipo de UTEC, por el constante apoyo y contribución al presente trabajo de investigación. A la Cooperación Suiza (SECO) y al Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento por el financiamiento, seguimiento y contribuciones al presente trabajo de investigación. Por último, a las personas encargadas del monitoreo en la red de alcantarillado y a las EPS (SEDAPAL y SEDAPAR) de cada ámbito de estudio.

## RESUMEN

La COVID-19 es una enfermedad causada por el Síndrome Respiratorio Agudo Severo Coronavirus 2 (SARS-CoV-2, por sus siglas en inglés), el cual fue reportado por primera vez en Wuhan, China, en diciembre de 2019. Desde entonces, el SARS-CoV-2 ha causado una pandemia con consecuencias, económicas, sociales, sanitarias y educativas nefastas a nivel mundial; ocasionando más de 500 millones de casos confirmados y 6,2 millones de fallecidos según la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Perú ha sido uno de los países más afectados por la COVID-19 a nivel mundial, con más de 3,5 millones de casos confirmados y 212,000 fallecidos para abril de 2022. Perú ha tenido varias limitaciones para controlar la pandemia, incluyendo una limitada capacidad para identificar nuevos casos de COVID-19 en tiempo real (incidencia), junto con infraestructura de salud insuficiente para atender a la población infectada. Si bien la identificación de nuevos contagios, se puede lograr aplicando pruebas de descartes masivas, éstas son costosas, no llegan a toda la población, y no son 100% confiables (falsos positivos o negativos). Junto a ello, la insuficiente infraestructura de salud restringe la posibilidad de realizar diagnósticos clínicos a gran escala, con una amplia cobertura. En este contexto, el monitoreo del ARN del SARS-CoV-2 en las aguas residuales ofrece una alternativa costo-eficiente y de amplio alcance para medir la incidencia de la COVID-19 en tiempo real y con resolución espacial, como complemento a los indicadores del sector salud. Esta estrategia consiste en medir el ARN viral descargado por la población infectada (sea sintomáticos, asintomáticos o pre-sintomáticos) a la red de alcantarillado, en la cual puede persistir por algunos días.

En este estudio se propone y valida la implementación de un monitoreo descentralizado del ARN del SARS-CoV-2 en la red de alcantarillado de las 3 ciudades más pobladas de Perú: Lima Metropolitana, Callao y Arequipa Metropolitana. Los datos sobre cargas virales mostraron las mismas tendencias que los indicadores de salud, tales como casos positivos (de la COVID-19) y mortalidad total. Además, en este estudio pudimos identificar puntos críticos de contagio dentro de las áreas urbanas monitoreadas

(hot spots). Esta información, junto con la detección anticipada de nuevas olas de contagio permitieron contribuir a la toma de decisiones por parte de las autoridades sanitarias, para implementar acciones de control tales como cercos epidemiológicos o vacunación intensiva en zonas de mayor prevalencia, junto con alertar a la población. En general, los resultados obtenidos en este trabajo de investigación respaldan el monitoreo de aguas residuales como una herramienta valiosa y rentable para asistir a las autoridades del sector salud en el control de la pandemia de la COVID-19. Más aún, el trabajo realizado constituye el primer ejemplo del uso de epidemiología basada en aguas residuales en Perú, y crea las bases para su aplicación en esta y otras afecciones futuras.

**PALABRAS CLAVES:**

Plan de Monitoreo; Epidemiología Basada en Aguas Residuales; SARS-CoV-2; COVID 19; Vigilancia Ambiental, Monitoreo Epidemiológico; Hotspots

# **ABSTRACT**

## **DEVELOPMENT OF A SPATIO-TEMPORAL SURVEILLANCE SYSTEM FOR COVID-19 BASED ON WASTEWATER MONITORING OF SARS-COV2 IN URBAN AREAS FROM LIMA, CALLAO AND AREQUIPA, PERU**

COVID-19 is a disease caused by the Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus - 2 (SARS-CoV-2), first reported in Wuhan, China, in December 2019. Since then, it has caused a pandemic with public, economic, social, educational, and worldwide health crises; causing more than 500 million confirmed cases and 6.2 million deaths, according to the World Health Organization (WHO). Peru has been one of the most countries affected by COVID-19 worldwide, with more than 3,5 million confirmed cases and 212,000 deaths as of April 2022. Peru has had several limitations to control the pandemic; one of them is the inadequate monitoring of existing new cases of COVID-19 in real-time (incidence). This can be achieved with mass screening tests and clinical diagnoses at the national level. However, these tests are expensive, do not reach the entire population, and are not 100% reliable (false positives or negatives). The monitoring of SARS-CoV-2 RNA in wastewater consists of measuring the viral RNA discharged by the infected population into the sewage network system of a region, offering a reliable, unbiased, and low-cost alternative, complementing the indicators of medical care. This study proposes and validates implementing decentralized monitoring of SARS-CoV-2 RNA in the sewage network of the three most populated cities in Peru: Metropolitan Lima, Callao, and Metropolitan Arequipa. The data on viral loads showed the same trends as health indicators, such as daily positive cases or deaths from COVID-19. In addition, we were able to identify contagion hotspots within the monitored urban areas that can contribute to decision-making by health authorities, including actions to combat the COVID-19 pandemic. Overall, the results support wastewater monitoring for SARS-CoV-2 RNA as a valuable and cost-effective tool to monitor the COVID-19 pandemic in the Peruvian context.

**KEYWORDS:**

Monitoring Plan; Wastewater-Based Epidemiology; SARS-CoV-2; COVID 19;  
Environmental surveillance, Epidemiological Monitoring; Hotspots.

# INTRODUCCIÓN

El monitoreo de aguas residuales como herramienta de vigilancia epidemiológica se conoce desde la década de 1940, cuando se usaba para detectar el poliovirus, causante de la poliomielitis, en los Estados Unidos (Paul & Trask, 1941). Dado que las concentraciones virales pueden variar a través del tiempo, indicando la presencia o ausencia de algún virus, el monitoreo de las aguas residuales puede ser una herramienta con gran potencial para evaluar y mitigar los brotes virales en una comunidad (Farkas et al., 2020).

En consecuencia, la vigilancia epidemiológica a través del monitoreo de aguas residuales surge rápidamente como una herramienta para determinar la propagación de la COVID-19 en las ciudades. Muchos grupos en todo el mundo implementaron la vigilancia de las aguas residuales para el ARN del SARS-CoV-2 en plantas de tratamiento de aguas residuales, cuerpos de agua ambientales o redes de alcantarillado, con notable éxito (Mota et al., 2021; Ahmed et al., 2020; La Rosa et al., 2020; Randazzo et al., 2020).

Adicionalmente, Mota et al. (2021) pudieron identificar puntos críticos dentro de áreas urbanas heterogéneas basándose en datos de aguas residuales de ARN del SARS-CoV-2, mientras que Haak et al. (2021) evaluaron los patrones espaciales de COVID-19 a través del monitoreo espacial en cuencas de aguas residuales (Mota et al., 2021; Haak et al., 2022), resultando en un enfoque útil para monitorear esta dinámica y orientar la toma de decisiones sobre cuarentenas/distanciamiento social y la focalización de recursos (Medema, Been, et al., 2020).

Perú ha experimentado un progreso sustancial en sus indicadores de salud, que incluye reducciones en la mortalidad infantil y materna junto con una mayor esperanza de vida (Carrillo-Larco et al., 2022). Sin embargo, la pandemia de COVID-19 colapsó duramente el sistema de salud, con más de 3,5 millones de casos confirmados, resultando en 212,000 fallecidos al mes abril de 2022 (MINSA, 2022). Con ello, Perú se convirtió en uno de los países con mayor número de muertes per cápita en el mundo (OMS, 2022).

De esta manera, surge la necesidad de investigar, proponer y validar un adecuado plan de monitoreo y protocolo de detección del ARN del SARS-CoV-2 acorde al contexto peruano, que permita complementar la falta de datos sobre la COVID-19 en el país para un mejor control de la pandemia.

En la presente investigación, ejecutamos un plan de monitoreo y protocolo de detección del ARN del SARS-CoV-2 en las aguas residuales de tres ciudades importantes de Perú: Lima Metropolitana, la capital; Callao, ubicado cerca de Lima; y Arequipa Metropolitana, la segunda ciudad más grande de Perú. La población total estimada monitoreada en este estudio fue de siete millones en Lima Metropolitana y Callao (lo que representa el 65% de la población residente en estas localidades) y 0,8 millones en Arequipa (55% de la población residente en Arequipa Metropolitana) (INEI, 2017).

Además, proporcionamos un nuevo indicador epidemiológico para el control de la pandemia de COVID-19, demostrando la utilidad del análisis epidemiológico basado en aguas residuales, especialmente en el contexto de datos clínicos extremadamente escasos, índices socioeconómicos heterogéneos y sistemas de salud incompletos.

Asimismo, el análisis del ARN del SARS-CoV-2 en aguas residuales ha demostrado ser confiable, ya que: (1) Sigue la misma tendencia que los indicadores del sector salud. (2) Ofrece una alternativa más económica, sensible y de mayor alcance para anticiparse a la aparición de nuevas olas de contagio. (3) Permite identificar puntos calientes de contagio comunitario dentro de áreas metropolitanas grandes y heterogéneas. (4) Puede usarse como un enfoque general para comprender la propagación de la pandemia en una ciudad y (5) Puede garantizar la resiliencia de la salud pública más allá de esta pandemia.

Por último, el monitoreo de aguas residuales para la vigilancia epidemiológica a gran escala es un área que no se ha aplicado ni investigado antes en el país. El Saneamiento es una rama de la Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental que tiene como principales objetivos asegurar la salubridad para la población a través de, entre otras actividades, el estudio y monitoreo de aguas residuales y la implementación de nuevas tecnologías

apropiadas para garantizar la salud pública. De esta manera, el presente trabajo propone una nueva línea de investigación en el Perú para la rama de Saneamiento, con el potencial de desarrollar nuevos proyectos de investigación interdisciplinarios y así contribuir con la atención de las necesidades actuales de sanidad en la comunidad y su entorno.