

Modelo geoespacial para priorizar los factores de riesgo ambiental de las comunidades sin alcantarillado sanitario en la cuenca del Río Grande de Loíza en Puerto Rico¹

Geospatial model to prioritize environmental risk factors of communities without sanitary sewer in the Rio Grande de Loiza basin in Puerto Rico

María de Lourdes Fernández Valencia
Fundación Universitaria Iberoamericana (FUNIBER)
lufeva@gmail.com

María del Carmen Rivera Rivas
Universidad Politécnica de Puerto Rico
mcrivera@uppr.edu

Resumen: La cuenca del Río Grande de Loíza de Puerto Rico es la más grande de la isla, compuesta por 15 subcuencas. Estos ríos están contaminados con patógenos relacionados a las Comunidades Sin Alcantarillado Sanitario denominadas ComSAS, que utilizan pozos sépticos defectuosos o descargas directas a los cuerpos de agua. La Agencia Federal de Protección Ambiental la describe como la de mayor prioridad de atención. La investigación plantea el objetivo de elaborar un modelo geoespacial para incorporarse al proceso de cumplimiento de la ley de agua limpia. Incluye el diseño de una metodología ad hoc, que selecciona los factores ambientales y establece los parámetros para priorizar las áreas por nivel y tipo de riesgo. El análisis multicriterio incorporó las capas de información geográficas que incluyen estructuras/km², la cercanía a los ríos, la clasificación de uso de terrenos, y la presencia de suelos hídricos con grupos hidrológicos tipo D. El resultado generó la capa de información geográfica que identifica el 27 % del área de estudio como alto y muy alto riesgo. Las agencias estatales y federales pueden podrán incorporar esta herramienta de innovación en el proceso de toma de decisiones para evaluar de forma rápida las comunidades de alto riesgo.

Palabras claves: Agua contaminada, análisis Multicriterio, Comunidades Sin Alcantarillado Sanitario, modelo geoespacial, sistema de información geográfico, cuenca hidrográfica, pozos sépticos

Abstract: The Rio Grande de Loíza basin of Puerto Rico is the largest on the island, composed of 15 sub-basins. These rivers are contaminated with pathogens related to Communities Without Sanitary Sewerage denominated ComSAS, which use defective septic tanks or direct discharges

¹ Colabora en este artículo Christian Adolfo Villalta Calderón, presidente del Comité Técnico de AIDIS Puerto Rico desde el 2005 hasta el 2011 (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente) y actualmente es miembro de la Junta de Directores (2019-2023).

to water bodies. The Federal Environmental Protection Agency describes it as the highest priority for attention. The research raises the objective of developing a geospatial model to be incorporated into the process of compliance with the Clean Water Act. It includes the design of an ad hoc methodology, which selects the environmental factors and establishes the parameters to prioritize the areas by level and type of risk. The multi-criteria analysis incorporated the geographic information layers including structures/km², the proximity to rivers, the classification of land use, and the presence of type D hydrologic soil group. The result generated the shapefile layer that identifies 27 % of the study area as high and very high risk. State and federal agencies will be able to incorporate this innovation tool into the decision-making process to quickly assess high-risk communities.

Keywords: Communities without sanitary sewerage, contaminated water, geospatial model, geographic information system, hydrographic basin, multi-criteria analysis, septic tanks.

Introducción

El agua es el recurso natural más abundante de la tierra y los humanos la utilizan diariamente para consumo, actividades domésticas y actividades recreativas entre otras, de él depende la supervivencia de todas las especies y los ecosistemas. El manejo integral de este recurso es indispensable para garantizar su disponibilidad y calidad. La investigación del modelo geoespacial consideró los tres pilares fundamentales del desarrollo sostenible: (1) La sociedad conformada por la población de las Comunidades Sin Alcantarillado Sanitario (ComSAS²) de la cuenca del Río Grande de Loíza (RGL); (2) El medio ambiente con los factores ambientales seleccionados; (3) La economía del Programa del Fondo Rotatorio Estatal (PFRE) para cumplir con la Ley Federal de Agua Limpia (CWA, por sus siglas en inglés) de la Agencia Federal de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés).

El saneamiento de agua es una prioridad a nivel nacional y mundial. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2017) anunció que las diarreas son la segunda causa de muerte en niños y ocasiona 525,000 muertes cada año. Afirman que las enfermedades gastrointestinales están relacionadas con los organismos patógenos de heces fecales en las aguas residuales, pozos sépticos y pueden prevenirse con acceso a alcantarillado sanitario.

Puerto Rico (PR) es una isla ubicada en las Antillas Mayores del Caribe, de acuerdo con el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales (DRNA, 2016) hay 54 cuencas

² Ver apéndice para la descripción de los acrónimos.

mayores y 10 menores. El RGL la de mayor extensión territorial con un área de 751 km² (290 mi²), cuenta con una población de 494,366 habitantes (SDC-PR, 2020), y provee abasto de agua potable a sectores de población del área metropolitana y ciudadanos de la cuenca.

La EPA (2019) tiene la jurisdicción para hacer cumplir el CWA. Esta ley establece los requisitos y los estándares de calidad agua superficial, regula las descargas, y desarrolla los programas necesarios para lograr la meta de restaurar y mantener la integridad química, física y biológica de las aguas de los Estados Unidos de América (EUA). El Código Federal de Regulaciones 40 CFR 131.40 incluye los estándares de patógenos y de calidad de agua que aplican a PR. Entre los programas de la EPA, relacionados a la investigación, se tiene el Programa de Cuencas Hidrográficas, el Programa de Manejo de Fuentes No Puntuales (NPSMP, por sus siglas en inglés) y PFRE.

La EPA (2011) llevó a cabo estudios en las cuencas prioritarias de PR, los cuales confirmaron que en la cuenca del RGL hay presencia de aguas residuales no tratadas originadas en las comunidades que tienen pozos sépticos o descargas directas. Determinaron que el 50 % de los pozos sépticos no funcionan correctamente y que el 65 % de la población aguas arriba de la represa carece de alcantarillado sanitario. Concluyeron que la cuenca del RGL es la más deteriorada y la de mayor prioridad de atención por fuentes no puntuales, por lo que plantearon la necesidad de diseñar e implementar soluciones geoespaciales costo efectivas para atender a las ComSAS de mayor prioridad.

Soderberg (2014) ha expresado que dichas comunidades representan un problema de salud pública y ambiental. La presencia de desarrollos no planificados, ilegales y/o terrenos invadidos en las cuencas, contamina el agua de los ríos por las descargas directas o de pozos sépticos. Por otro lado, Quiñones (2022) estimó que en PR hay 600,000 pozos sépticos que carecen de diseños adecuados. El Plan de Uso de Terrenos de la Junta de Planificación de PR (JP, 2015) afirmó que la segregación de parcelas y el desarrollo de las áreas rurales con viviendas no planificadas, cuyos pozos sépticos no

cumplen con los requisitos de diseños adecuados, ocasionan impactos económicos y ambientales.

El DRNA (2016) admitió que las limitaciones de cobertura del servicio de alcantarillado sanitario de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de PR (AAA), y la falta de controles sobre los métodos autónomos de disposición de aguas usadas contribuyen a los problemas de calidad de agua. Los datos oficiales de los Informes Integrados del DRNA (2020) confirmaron que en la cuenca del RGL hay contaminación de agua por patógenos de fuentes dispersas de origen doméstico, lo que ha ocasionado incumplimiento con el parámetro regulatorio de *Enterococos*.

Vázquez et al. (2020) explicó que el padre de la epidemiología, John Snow (1813-1858), correlacionó las muertes de cólera en Londres con un desagüe de aguas usadas y fue quien preparó el primer mapa que representó un fenómeno de salud pública en un contexto espacial, observando la incidencia de las muertes con el lugar de vivienda y la fuente de contaminación. El avance de la tecnología del Sistema de Información Geográfica (SIG) ha permitido realizar análisis multicriterio para determinar el riesgo y la vulnerabilidad de una manera efectiva, visual y sustentada. Crisóstomo (2021) expuso que “es el proceso analítico que permite identificar diversas soluciones ante un problema. Representa un gran apoyo en la toma de decisiones durante el proceso de planificación, ya que permite integrar diferentes criterios de acuerdo con la opinión de actores en un solo marco de análisis para dar una visión integral”.

Los recursos geospaciales se refieren a las Capas de Información Geográficas (CIG) y/o modelos elaborados por agencias con jurisdicción para levantar, capturar y validar datos en un SIG. En EUA y PR los datos son de dominio público y las agencias son responsables de mantener las bases de datos vigentes y disponibles. Sevillano (2020) concluyó que “el análisis de riesgo en su conjunto debe corresponder a observaciones de condiciones amenazantes, así como también a estudios de vulnerabilidad social” resaltando que “la integración de criterios en un SIG es adecuada para establecer peligrosidad”. Por otro lado, Bravo et al. (2020) expuso que ejecutar estos modelos permite comprender los impactos que tiene un criterio ambiental como la escorrentía, en

un análisis hidrológico, en el cambio del uso del suelo y en el transporte de contaminantes.

Ante la problemática expuesta, se planteó el objetivo de elaborar un modelo geoespacial para priorizar los factores de riesgo ambiental relacionados a las ComSAS. Este podrá facilitar la toma de decisiones en el proceso de cumplimiento del CWA en la cuenca del RGL en PR. Esta cuenca hidrográfica se eligió como unidad de planificación y área de estudio. El Modelo ComSAS se diseñó para ser utilizado en los programas de cuencas de la EPA con el propósito de favorecer el análisis geoespacial de las ComSAS, la selección de proyectos de infraestructura para asignar fondos en las áreas que requieran mayor atención y contribuir a la solución del problema de contaminación por descargas de aguas usadas de fuentes domésticas. El marco legal federal y estatal permitió identificar los parámetros de cumplimiento que se utilizaron en el modelo geoespacial.

Metodología

La investigación se comenzó en el 2015 revisando los informes oficiales de las agencias reguladoras para el periodo de 2008-2020, los datos oficiales del censo 2020, la revisión de la literatura y normativa vigente. La metodología se ejecutó en el SIG con el programa ArcGIS Pro 2.8.2 que está validado para producir información de utilidad en la toma de decisiones. La investigación utilizó los datos existentes de las bases de datos y generó datos nuevos a partir de las de las CIG disponibles y vigentes, tales como, el límite de la cuenca del RGL del Servicio Geológico Federal (USGS, por sus siglas en inglés), el Plan de agua del DRNA; hidrología provista por EPA en el 2019; los datos geoespaciales nacionales (EPA, 2021); los datos de Agua de Puerto Rico (USGS, 2021), el Portal de datos geográficos gubernamentales de Puerto Rico (PR.GOV, 2020); los datos de cobertura cuencas hidrográficas del Servicio Federal de Conservación y Recursos Naturales que incluye los mapas de los grupos de suelos hidrológicos (NRCS, 2021); La Administración Nacional Atmosférica y de Océano (NOAA, 2021), entre otros.

El Modelo ComSAS desarrolló una metodología *ad hoc* que permitió determinar las áreas de prioridad por el nivel y el tipo de riesgo, con el propósito de aportar a la solución del

problema planteado, utilizando el análisis geoespacial en el SIG. Incluyó los siguientes aspectos:

- **Delimitar el área de estudio.** Consistió en un análisis geoespacial para identificar las áreas a excluir con las CIG (PR.GOV, 2020) de las áreas desarrolladas con infraestructura sanitaria existente y propuesta de la AAA, los sistemas descentralizados, industriales y comerciales que tienen sistemas sépticos, las áreas industriales que tienen el permiso nacional de descarga de la EPA, y la foto aérea de la JP. Estas áreas se eliminaron de la CIG de la cuenca del RGL para obtener el límite geográfico del área de estudio *límite_ComSAS*.
- **Analizar los informes de calidad de agua superficial.** Estos proporcionaron los datos oficiales para obtener un diagnóstico de contaminación de agua y la priorización por patógenos para el periodo de 2008-2020. Esta fase incluyó los siguientes aspectos: (1) Determinar el orden de prioridad, que ocupa cada subcuenca del RGL en la lista vigente a nivel de PR, bajo el programa de manejo de fuentes dispersas (JCA, 2015), (2) Realizar un análisis cualitativo de los informes bianuales 305(b)/305(d) del DRNA para identificar las subcuencas que se monitorean por patógenos. (3) Realizar un análisis cuantitativo, para ello fue necesario descargar los datos del USGS (2021) y exportarlos a Excel para calcular los promedios. (4) Elaborar una CIG para incorporar los datos de patógenos con su mapa que se utilizó en la validación.
- **Identificar los factores de riesgo ambiental y seleccionar los criterios para priorizar.** En esta fase, el marco legal vigente proporcionó la base para elaborar la matriz correlacional de factores de riesgo. Incluye los parámetros de priorización que representan riesgo e inciden en las fuentes dispersas de origen domésticas, para las cuales existen CIG con data disponible y validada en el SIG. Los factores ambientales se identificaron en base a las características de la cuenca. La escala de riesgo estableció

cinco niveles: (0) muy bajo, (1) bajo, (2) medio, (3) alto y (4) muy alto, y se determinó un código de colores de verde a rojo.

- **Establecer los procedimientos geospaciales para elaborar el modelo.**

Esta fase incluyó el análisis geoespacial de riesgo de cada criterio y el análisis multicriterio de los factores de riesgo, dando el mismo peso a cada uno, y así se generó la CIG *Areas_riesgo_Comsas*. La programación por objetos se realizó en lenguaje Python para correlacionar columnas y reclasificarlas para obtener las CIG, los geoprocesos, y los mapas por nivel y tipos de riego de cada criterio. La figura 1 ilustra el procedimiento conceptual para elaborar el modelo de priorización partiendo de los datos en el SIG, y el mapa base del límite geográfico de la cuenca del RGL sobre el cual se efectuó el análisis geoespacial que genera una expresión geográfica con las áreas de prioridad de las ComSAS.

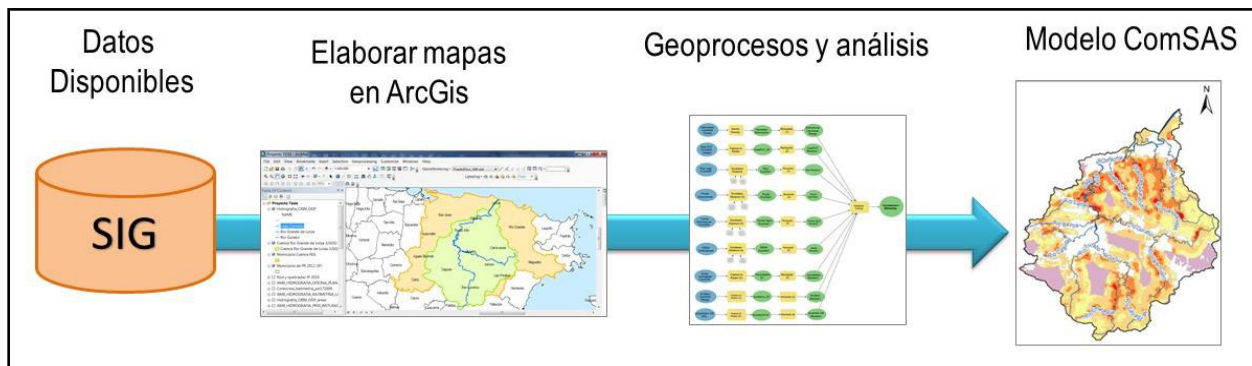


Imagen 1. Procedimiento conceptual para elaborar el Modelo de Priorización. Elaboración propia, 2022.

Los criterios seleccionados para el análisis multicriterio incorporaron la densidad de estructuras, la clasificación del Plan de Uso de Terrenos (PUT), la cercanía a ríos, y el grupo hidrológico. Cada CIG se convirtió a imagen [field to raster] y se procedió a reclasificar [reclass] con los parámetros asignados, por último, se realizó la ponderación [weighted overlay] dando el mismo peso a cada criterio. El SIG generó el mapa y la CIG de *Areas_riesgo_ComSAS*. La figura 2 muestra el geoproceso que da como resultado el Modelo ComSAS. Cabe mencionar que el criterio de densidad de estructuras requirió

elaborar una CIG que incluyó un exhaustivo análisis visual de la foto aérea para marcar cada una con un punto. Esta capa permitió estimar la densidad de estructuras por subcuenca y por km², así como, el estimado de las descargas sanitarias que se generan en las ComSAS.

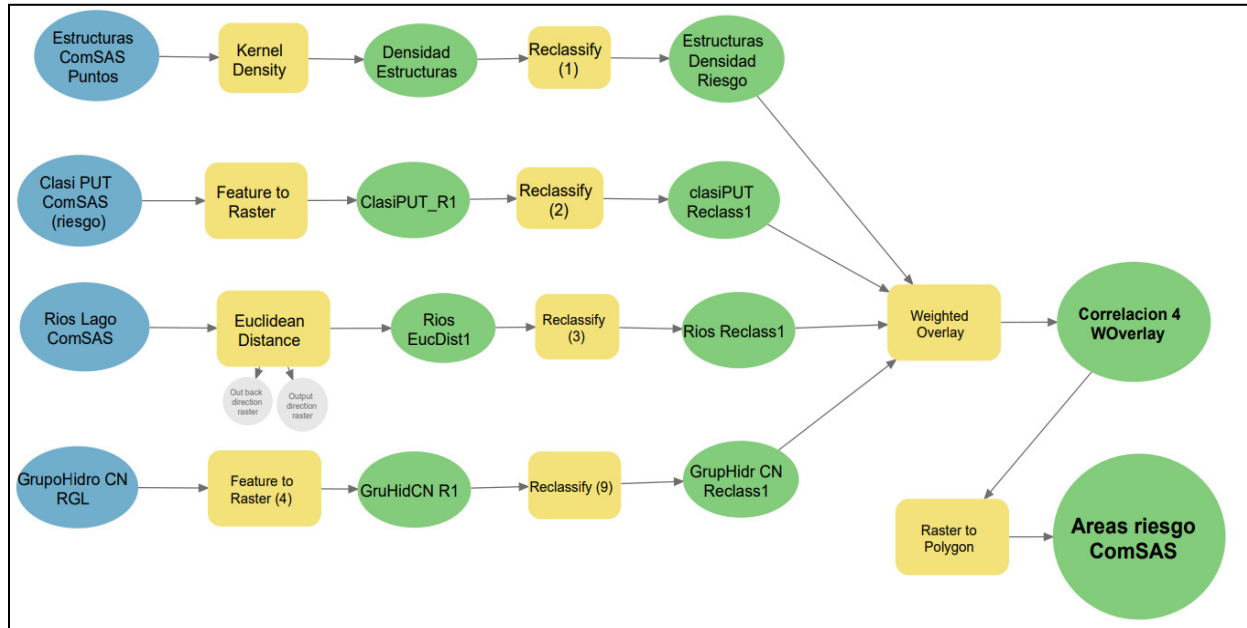


Imagen 2. Geoproceso del análisis multicriterio del Modelo ComSAS. Elaboración propia, 2022 en ArcGIS Pro 2.8.2.

También, se usaron de referencia las CIG de los acuíferos, las zonas inundables, la infraestructura de los pozos de agua, las tomas de agua, las Estaciones de Bombeo de Alcantarillado Sanitario (EBAS), y las plantas de tratamiento de aguas usadas.

- Realizar una modelación hidrológica. Este análisis se realizó con los datos regulatorios vigentes de FEMA y los programas de computadora disponibles de HEC-HMS (CoE, 2021a) y HEC-RAS (CoE, 2021b) del Cuerpo de Ingenieros de los EUA, el Atlas 14 (NOAA, 2021) y la metodología TR-55 (NRCS, 1999), para obtener los flujos máximos (peak flows) en los puntos de cierre de cada subcuenca, los números de curva, la topografía, la escorrentía, y el tipo de suelo hídrico entre otros.

- Elaborar la propuesta de innovación al proceso del PFRE. Este paso consistió en analizar el procedimiento existente de la agencia para integrar el modelo al flujograma de selección de proyectos para asignar los fondos.
- Validar el modelo y comprobar la hipótesis. El Modelo ComSAS se validó con la foto aérea, el sistema de prioridad vigente (JCA, 2015), los datos de Enterococos, y la presentación a expertos en el tema, personal de la EPA del Caribe y de la AAA.

Resultados

El diseño de la metodología *Ad Hoc* fue efectivo para elaborar el Modelo ComSAS, cuyos resultados se discute a continuación:

- **Delimitación el área de estudio.** Resultó factible generar la CIG de *límite_ComSAS*, y calcular la extensión territorial de 590 km², esto significa que el 79 % de área la cuenca del RGL no tiene servicio sanitario. De acuerdo con la información provista por la AAA durante el 2021, en la cuenca se encuentra el lago Loíza del cual se extraen 378,541 m³ diarios para potabilizarse en la planta de tratamiento Sergio Cuevas ubicada en el municipio de Trujillo Alto. La figura 3 ilustra el área de estudio, el área excluida y las subcuencas que la componen.

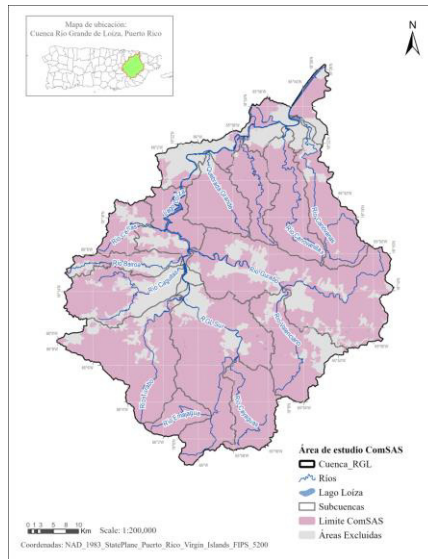


Imagen 3. Cuenca del Río Grande de Loíza: Área de estudio ComSAS. Elaboración propia, 2021 en SIG con ArcGIS PRO 2.8.2 y datos disponibles en GIS.PR.GOV (2020).

- **Análisis de calidad de agua superficial.** De acuerdo con el sistema de prioridad vigente (JCA, 2015), los primeros tres lugares de la lista en todo PR lo ocuparon los ríos Gurabo, Cagüitas y RGL Sur. Este sistema otorgó puntos a cada criterio, sin embargo, no hay un número homogéneo de parámetros para priorizar el riesgo.

En el análisis cualitativo de los informes bianuales se encontró que: (1) los indicadores de patógenos para calidad de agua han cambiado, hasta el 2016 se monitorearon los coliformes fecales y totales, a partir de ese año se han analizado los *Enterococos*, (2) De las 15 subcuencas de la cuenca del RGL, se monitorearon ocho y el lago Loíza. Los resultados se discuten a continuación:

El estándar de cumplimiento de los coliformes fecales era de 200 ufc/100ml para abasto de agua y recreación primaria. Durante el periodo 2008-2016 se tomaron 233 muestras de las cuales el 8 % cumplieron con el parámetro, y los resultados reportados fluctuaron entre 12 y 340,000 ufc/100 ml. En ese mismo periodo, también se monitorearon los coliformes totales, su estándar era de 2,000 ufc/100 ml para abasto de agua y recreación

primaria. Se tomaron 236 muestras de las cuales el 17 % cumplieron con el parámetro, los resultados reportados fluctuaron entre 45 y 3,300,000 ufc/100 ml. Los *Enterococos* se monitorearon del 2018-2020. Es el indicador vigente cuyo estándar de cumplimiento es 35 ufc/100 ml para abasto de agua y recreación primaria. Se tomaron 127 muestras de las cuales el 15 % cumplieron con el parámetro, los resultados reportados fluctuaron entre 5 y 19,000 ufc/100 ml. La figura 4 muestra los resultados promedios para el patógeno de *Enterococos* por subcuenca.

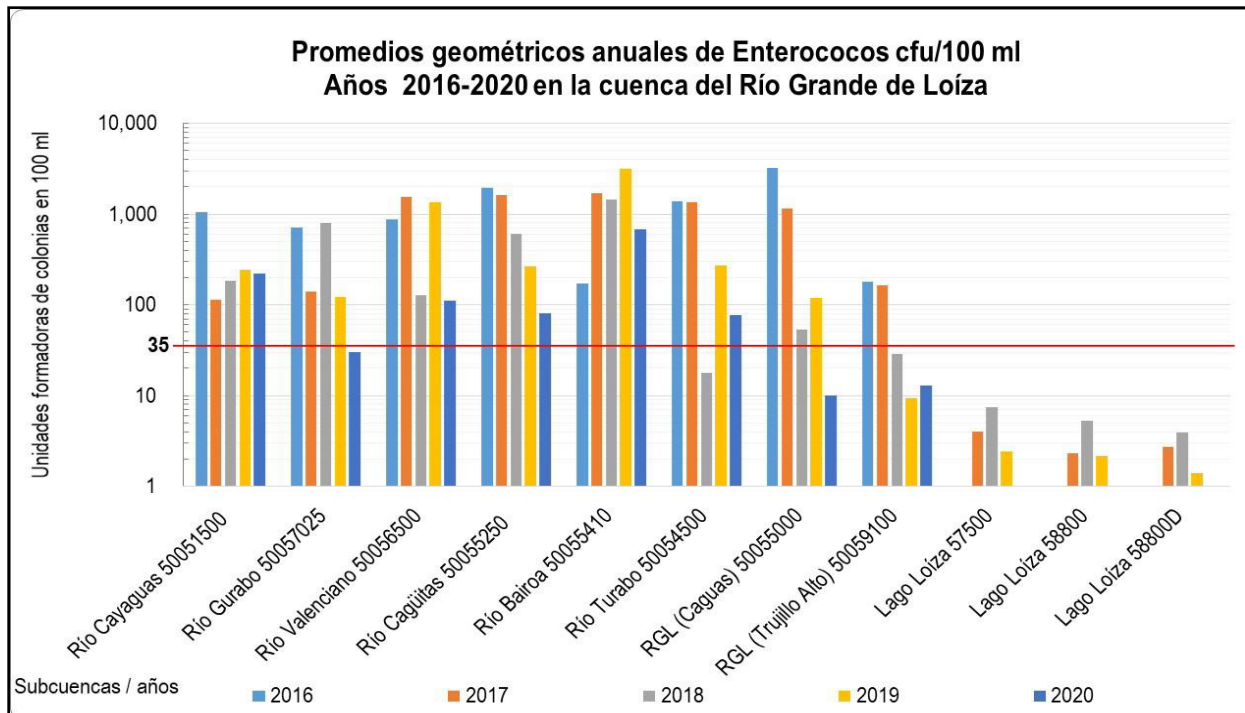


Imagen 4. Gráfica de resultados de Enterococos en la cuenca del RGL 2016-2020. La línea roja representa el valor regulatorio del 40 CFR 131.40 que es 35 ufc/100 ml. Adaptado con datos obtenidos del Sistema de Información de Agua Nacional, datos de agua para Puerto Rico por el USGS, 2021, documentos públicos del Sistema Geológico Federal, [Traducción propia]; Y de la Red de Lagos IR 2020, provistos por el DRNA, 2021, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales, documento público no publicado.

- Identificar los factores de riesgo ambiental y seleccionar los criterios para priorizar. El marco legal federal y estatal permitió extraer los parámetros base para los criterios seleccionados, con los cuales se elaboró la matriz por nivel y tipo de riesgo. La tabla 1 muestra los criterios y los resultados. Esta matriz es la base del Modelo ComSAS con la que se realizan los análisis geoespaciales. En estudios futuros los parámetros pueden ser ajustados a la normativa que le aplique y/o al aspecto ambiental que se desea explorar.

Criterio	Parámetros para priorizar el nivel y tipo de riesgo				
	Muy Alto (4)	Alto (3)	Medio (2)	Bajo (1)	Muy Bajo (0)
1. Estructuras en subcuencas					
A) Densidad Estructuras/km ²	>400	301-400	201-300	100-200	<100
B) Población (5 hab/estructura)	>2000	1501-2000	1001-1500	500-1000	<500
2. Uso de terreno y recursos naturales					
(Clasificación PUT, 2015)	AGUA SREP-H, SREP-AH, SREP-EH	SRC, SU	SREP (A, AE), SURP, SURNP	SREP (E, EA, EP)	Vial
3. Cercanía al cuerpo de agua superficial (Distancia en metros)					
Ríos principales y lago Loíza	≤ 400	401- 800	801- 1,200	1,201-1,600	1,600-2,000
4. Extracción de agua (distancia de radios en metros)					
Tomas y pozos de agua	≤ 500	501-1,000	1,001-1500	1,501-2,000	2,000-2,500
6. Estaciones de bombeo AAA (distancia de radios en metros)					
Riesgo por Desbordamiento	≤ 500	501-1,000	1,001-1500	1,501-2,000	2,000-2,500
Cercanía para conectar a EBAS	2,000-2,500	1,501-2,000	1,001-1501	501-1,000	≤ 500
7. Zonas inundables (FEMA, 2021)					
	A	VE	AE	AO	X
8. Áreas de agua subterránea					
A) Grupo Hidrológico	A	B	C	BC y CD	D
B) Tipo de acuífero	Carso Restringido	Valle Aluvial	Caliza costa Norte	Volcánica, ígneas y sedimentaria	Unidades confinadas
9. Análisis Hidrológico					
A) Escorrentía, Número de Curva (CN)	>80	61-80	41-60	21-40	<20
B) Grupo Hidrológico	D	C, CD	B, BC	A	A

Imagen 5. Criterios seleccionados: Factores de riesgo y parámetros de priorización. Véase apéndice para la descripción de acrónimos. Los criterios y parámetros se establecen con datos sustentados en la base legal y reglamentaria de los documentos públicos. Adaptado de Normas para el diseño de sistemas de alcantarillado sanitario (pp. IV-1), por la AAA, 1984, Autoridad de Acueductos y Alcantarillados, Puerto Rico; del Sistema de Prioridad para Proyectos de Fondos Rotatorios Estatales de Agua Limpia Año Fiscal 2019, DRNA, 2019, Departamento de Recursos Naturales y Ambientales; Mapas de Inundación, por FEMA, 2021, en Junta de Planificación; de Grupos Hidrológicos de Suelos. En Manual de Ingeniería Nacional de Hidrología, (Capítulo 7), por el NRCS, 2022, Departamento de Agricultura Federal, Servicio Nacional de Conservación de Recursos Naturales [Traducción propia]; el Memorial del Plan de Uso de Terrenos, por JP, 2015, Junta de Planificación, Gobierno de Puerto Rico; Y del Reglamento conjunto para la evaluación y expedición de permisos relacionados al desarrollo y uso de terrenos, por de JP, 2020, Junta de Planificación, Puerto Rico.

- **Establecer los procedimientos geoespaciales para elaborar el modelo.**

El análisis geoespacial permitió estimar 72,360 estructuras ubicadas en las áreas sin servicio de alcantarillado sanitario. Basado en el parámetro de diseño vigente (AAA, 1984), las descargas de aguas usadas por los pozos sépticos se calcularon multiplicando las estructuras por 1,325 L para un total de 95,877,000 L diarios (25,364,285 galones por día). La densidad de estructuras se obtuvo dividiendo las estructuras entre el área del límite ComSAS dando 123 estructuras/km². La CIG resultante *Areas_riesgo_ComSAS* permitió calcular las áreas totales por nivel y tipo de riesgo. El 27 % de la extensión territorial del área de estudio resultó de alto y muy alto riesgo (ver tabla 2). Las ComSAS ubicadas en estas áreas deberán ser evaluadas para determinar la funcionalidad de sus pozos sépticos, la severidad del problema y proveer las soluciones adecuadas conforme al tipo de suelo y viabilidad de tecnología.

Nivel Riesgo	Tipo Riesgo	Área km ²	% Área de riesgo
0	Muy bajo	2.12	0.41
1	Bajo	116.45	22.76
2	Medio	253.54	49.56
3	Alto	128.80	25.18
4	Muy alto	10.65	2.08
Total Áreas de riesgo		511.56	
ComSAS a más de 2,000 mts		78.04	
Área total Límite ComSAS		589.60	

Imagen 6. Áreas de Riesgo en el límite ComSAS. Elaboración propia, 2022. Elaboración propia, 2021 en SIG con ArcGIS Pro 2.8.2.

El mapa “Modelo ComSAS” elaborado por la investigación, se ilustra en la figura 5 con los colores definidos para representar el nivel y tipo de riesgo. Disponer de esta CIG permite identificar las áreas de alta prioridad y tomar decisiones para dirigir los esfuerzos y el financiamiento de proyectos bajo el PFRE. En adición, el mapa muestra las CIG infraestructura sanitaria existente de las EBAS, los pozos y las tomas de agua, y las plantas de tratamiento de aguas usadas. Se observa que las áreas excluidas colindan

con los cuerpos de agua y están asociadas a suelos urbanos desarrollados que cuentan con infraestructura de AAA existente y/o propuesta. Las áreas resultantes de alto riesgo (rojo) colindan con los cuerpos de agua y se le dio mayor prioridad a las ComSAS de la subcuenca del Lago Loíza debido a que de éste se extrae una cantidad sustancial de agua para potabilizar y suplir a los habitantes del área metropolitana.

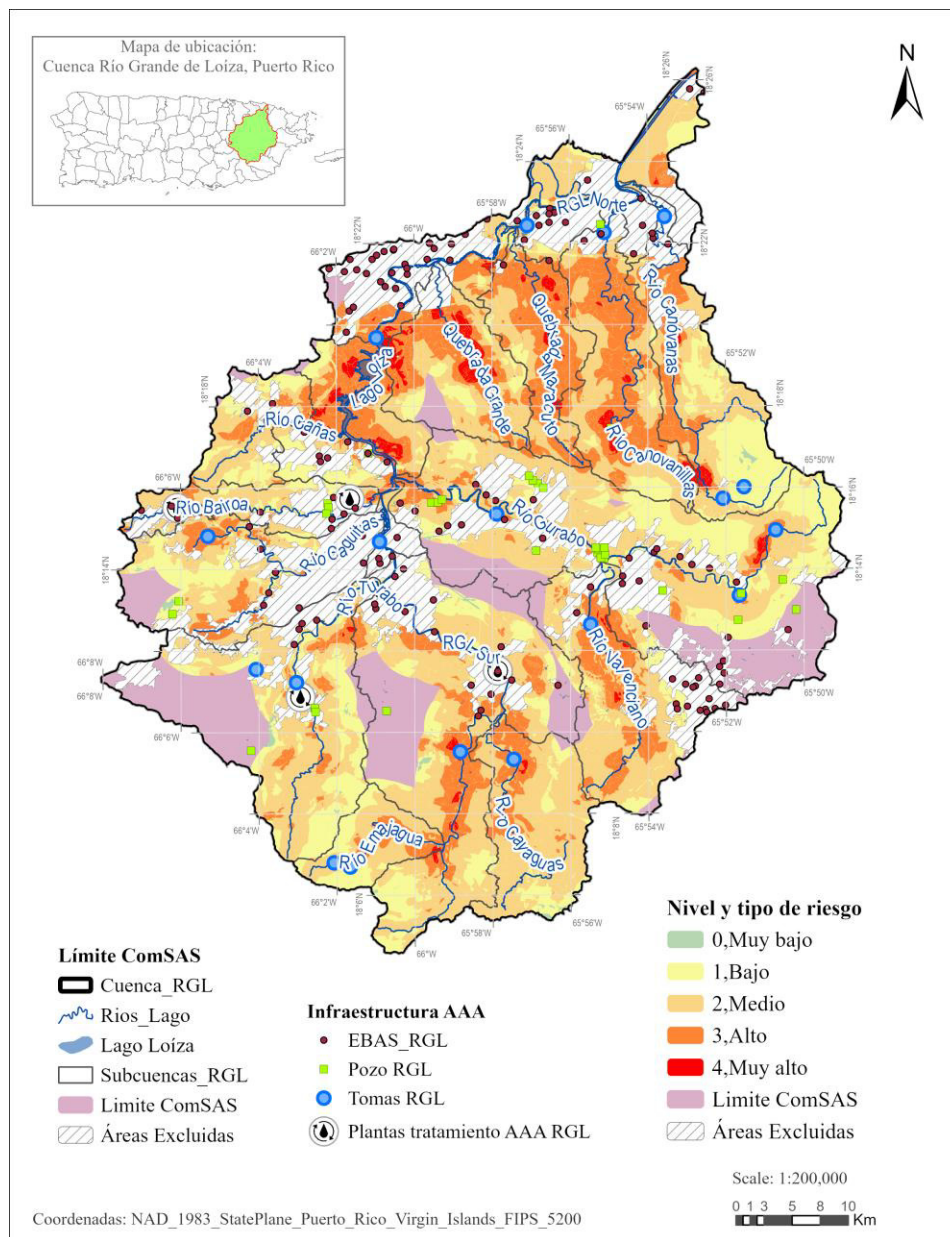


Imagen 7. Mapa Modelo ComSAS: Áreas de riesgo en la cuenca del RGL.

- Realizar una modelación hidrológica.** Mediante este análisis se determinó que el 70% del área de la cuenca del RGL está conformada por suelo con grupo hidrológico D de baja infiltración y se obtuvo un número de curva (CN) de 82, factores que favorecen la escorrentía y son indicadores de la presencia de zonas urbanizadas. La precipitación fluye desde el tope de la cuenca hasta llegar al lecho de los ríos de las subcuencas. Partiendo

de la CIG de contornos topográficos se identificó al río Gurabo con la mayor elevación de 1,060 msnm y disminuyendo a 20 msnm en el punto de cierre del lago Loíza, hasta 0 msnm en la desembocadura en el Océano Atlántico. Los flujos pico de las subcuencas al Sur y Oeste que llegan al Lago Loíza son de 3,235 m³/seg (114,243 pcs), y de ahí viajan por el RGL, que a a vez recibe los flujos de las subcuencas al Norte, para desembocar al mar con un caudal de 8,750 m³/seg (309,000 pcs).

- **Elaborar la propuesta de innovación al proceso del PFRE.** Al verificar los procedimientos gubernamentales vigentes para seleccionar los proyectos bajo el PFRE se encontró que no incluye un análisis de priorización de riesgo, sino un sistema de aspectos que debe cumplir el proponente, en el cual se le asignan puntos para ubicar al proyecto. El análisis de la lista de prioridad del PFRE de 1994-2020 reveló que se han desembolsado \$693,518,113 dólares en 97 proyectos en todo PR, de los cuales 11 han sido en el área de la cuenca del RGL para un total de \$66,015,462. En el periodo de 2013-2021 se asignaron fondos para la infraestructura en las plantas de la AAA y pluvial en la cuenca, sin embargo, no hubo proyectos dirigidos a soluciones descentralizadas en las ComSAS. Fue factible elaborar una propuesta para integrar el Modelo ComSAS al proceso existente para la toma de decisiones, la cual se presentó a la EPA del Caribe quienes entendieron que será una aportación de gran utilidad (ver la imagen 8).

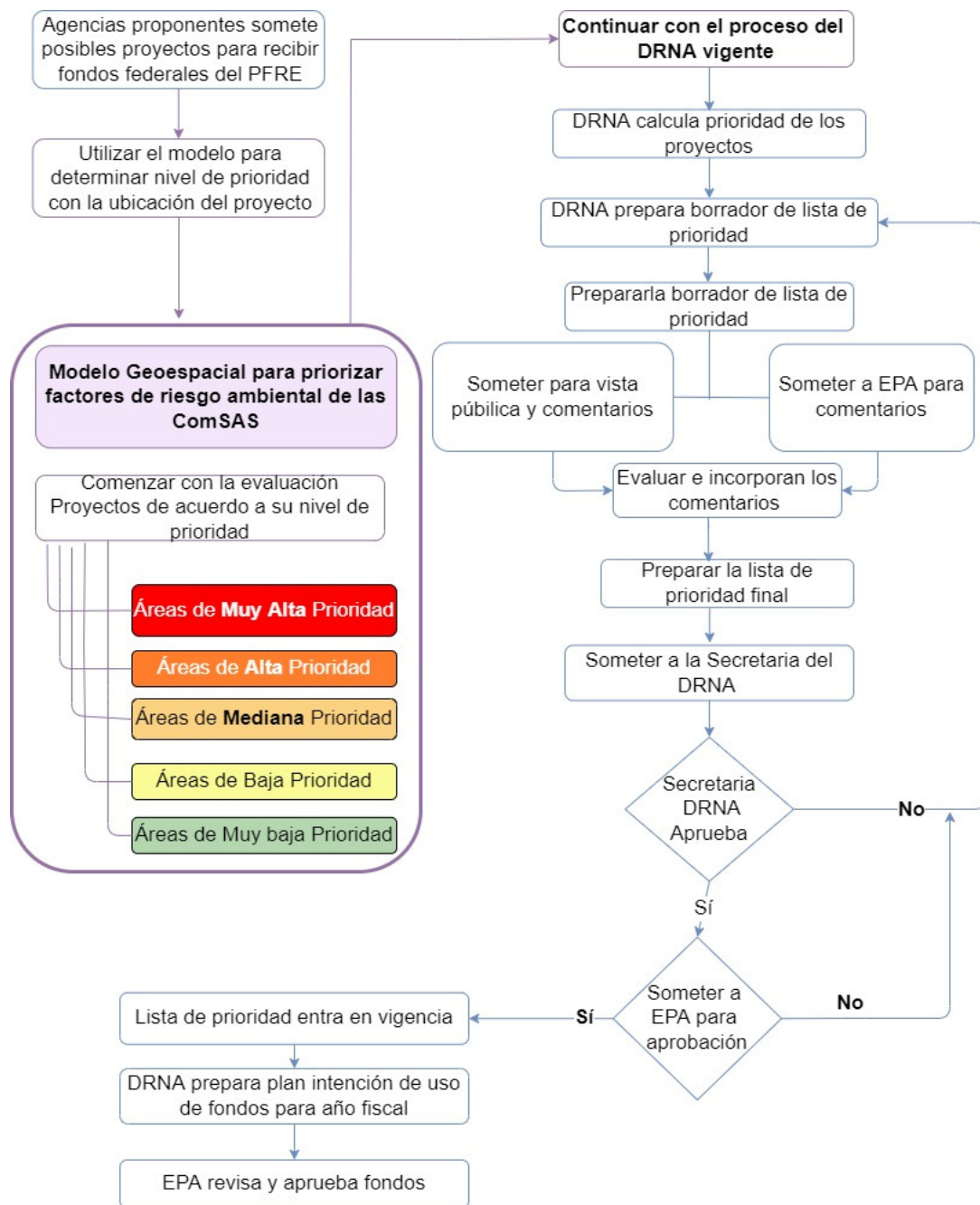


Imagen 8. Flujograma propuesto para integrar el Modelo ComSAS al proceso vigente del PFRE. La propuesta para integrar el Modelo ComSAS se muestra en los cuadros violeta, es un paso adicional sin alterar el procedimiento existente (recuadros azules). Adaptado con información provista por el Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico, documento de dominio público, no publicado.

- **Validar el Modelo ComSAS.** Los expertos en el tema opinaron que es de utilidad para identificar las áreas sin infraestructura sanitaria que necesitan tecnologías descentralizadas para tratar las aguas usadas; y la toma de extracción de agua del Lago Loíza debe dársele prioridad porque es la que supele agua a parte de la población metropolitana.

El análisis geoespacial resultante para validar se ilustra en la figura 7. El mapa a la izquierda es el resultante del Sistema de Prioridad (JCA, 2015) de acuerdo con el puntaje obtenido por las agencias reguladoras; El mapa del centro representa los resultados de patógenos para el indicador *Enterococos* (DRNA, 2020) de calidad de agua superficial; El mapa a la derecha muestra las áreas de riesgo resultantes del Modelo ComSAS. En el primer mapa se observa que las subcuencas de los ríos Gurabo y Cagüitas son las prioritarias, sin embargo, en términos de los resultados de *Enterococos* son los Ríos Bairoa y Valenciano, y el modelo da como resultado áreas de muy alto riesgo el Lago Loíza y las subcuencas al Norte de la cuenca.

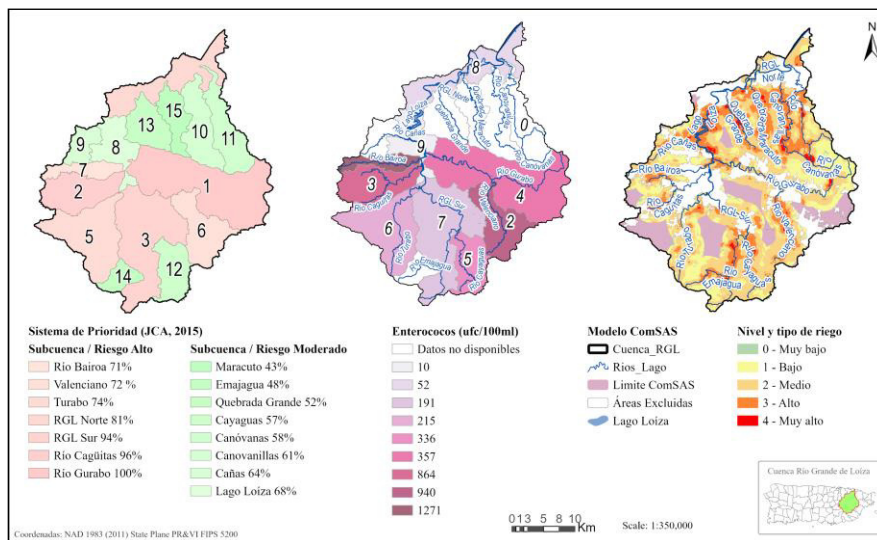


Imagen 9. Validación del Modelo ComSAS. Elaboración propia, 2022 en el SIG con los datos de dominio públicos del Sistema de Prioridad vigente (JCA, 2015), los datos de patógenos de *Enterococos* (USGS, 2021) y el mapa resultante Modelo ComSAS.

A continuación, se discuten los hallazgos de la investigación que se desprenden del Modelo ComSAS:

- La subcuenca del lago Loíza es la más crítica y de prioridad de atención, aun considerando que el lago propicia la dilución de los contaminantes patógenos. Presenta los criterios de áreas de vida silvestre y bosques auxiliares, clasificación de uso de terreno como recurso hídrico (SREP-EH, H, agua), cercanía al lago, densidad de estructuras, la extracción de agua, la topografía que propicia la escorrentía, los flujos que se aportan las subcuencas de los ríos Cañas, Bairoa, Turabo, Gurabo y RGL Sur al desembocar al lago y en adición arrastran por su causa la carga de contaminantes.
- Las subcuencas quebradas Grande, Maracuto, ríos Canóvanas y Canovanillas no se monitorean para patógenos y se ubican en priorización de riesgo moderado en el sistema (JCA, 2015) debido a que no se extrae agua para suplir agua potable. El modelo las representa con mayor prioridad debido a la densidad poblacional, a la cercanía a los cuerpos de agua, grupo hidrológico y PUT. En adición, no cuentan con EBAS que permitan conectarlas al sistema de alcantarillado.
- El potencial del riesgo de contaminación a los acuíferos por pozos sépticos es limitado, debido a la presencia de grupo hidrológico D de baja infiltración que favorece la escorrentía.
- El sistema de prioridad (JCA, 2015) identifica a los ríos Gurabo y Cagüitas como los más deteriorados. Al analizar el mapa resultante del modelo se observan áreas de alto riesgo que no colindan con los cuerpos de agua, sin embargo, tiene pendientes pronunciadas que favorecen la escorrentía y el posible transporte de contaminantes por medio del sistema pluvial de las áreas excluidas y de los suelos urbanos.
- La ausencia de datos de monitoreo de patógenos en varias subcuencas coincide con las áreas de alto riesgo resultantes de áreas más cercanas a los ríos.

- La correlación de las subcuencas con el nivel de contaminación no se pudo realizar debido a que no se monitorean todas las subcuencas.
- Los resultados de *Enterococos* indican que las cuatro subcuencas más contaminadas son los ríos Bairoa, Valenciano, Cagüitas, y Gurabo. Los valores altos en estas subcuencas pueden estar asociados a las áreas excluidas que están programadas por la AAA para proveer el servicio de infraestructura y que aún no la tienen, a descargas de las plantas de tratamientos de AAA, a los tiempos de concentración bajos, las velocidades de flujo bajas y/o a los diferenciales de pendiente que facilitan la contracción del contaminante.
- Deberá prestarse atención a las ComSAS ubicadas en aguas abajo de las tomas y pozos de agua, en especial, las que se ubican aguas abajo de la toma de agua del lago Loíza.

Conclusiones

Este proyecto permite adentrarse en el tema de los pozos sépticos domésticos y el impacto que tienen los patógenos en los cuerpos de agua de los cuales se extrae el recurso indispensable para la vida humana y de los ecosistemas. La cuenca del RGL es grande y compleja por la cantidad de subcuencas que incluye, sumando a las variables que dificultaron el proceso de análisis de los criterios seleccionados, sin embargo, fue factible elaborar un modelo geoespacial de priorización de riesgo. El mapa resultante es una aportación que facilita identificar la ubicación de las ComSAS respecto su nivel de riesgo, para solicitar los fondos del PFRE y así dirigirlos a las áreas de mayor prioridad para mejorar la calidad de agua.

La metodología ad hoc tiene el potencial de replicarse en otras cuencas de PR, de los EUA y de otros lugares ajustándolo a sus realidades y datos existentes. Puede adaptarse a nuevos esquemas regulatorios y de planificación, haciendo las modificaciones en la selección de parámetros para la protección del recurso hídrico. Es una herramienta que se espera sea adoptada por las agencias reguladoras para facilitar la toma de decisiones

en el proceso de cumplir con la ley de agua limpia y mejorar la calidad de las cuencas hidrográficas.

El análisis de los datos cualitativos y cuantitativos de los informes oficiales corroboran que en PR se han realizado estudios y estrategias para priorizar las ComSAS, y las agencias reguladoras reportan contaminación por encima de los niveles regulatorios. Es un aspecto de gran importancia a nivel federal y estatal, y se han elaborado leyes, reglamentos y programas dirigidos atender la problemática de calidad de agua bajo el CWA de la EPA, las leyes del DRNA y de la JP. Las soluciones se han limitado a la disponibilidad de los fondos del PFRE para infraestructura de AAA. Resulta necesario utilizar herramientas como el Modelo propuesto para llevar a cabo las soluciones en las ComSAS.

Luego de la investigación y de los análisis geoespaciales se concluye que los resultados de concentraciones altas de patógenos en la cuenca del RGL, pueden estar asociados a desbordamientos y/o malfuncionamiento de los pozos sépticos, averías en la infraestructura sanitaria, al transporte del contaminante por escorrentía, a fuentes agrícolas de animales, entre otras. El modelo permite identificar las áreas por nivel y tipo de riesgo en las ComSAS, y así dirigir los esfuerzos de los monitoreos de las agencias reguladoras, aquellas comunidades en las que sea factible proveer tecnologías descentralizadas para disminuir el impacto de las descargas de aguas usadas a los cuerpos de agua.

Los criterios del análisis hidrológico proveyeron información sobre las características de la del flujo y transporte por escorrentía a través de los cuerpos de agua hacia los puntos de cierre y la desembocadura. Estos pueden ser utilizados en estudios futuros que incluya la inspección, la evaluación y las prácticas de manejo de los pozos sépticos para correlacionar los flujos pico con los niveles de contaminación y con los procedimientos de monitoreo por las agencias reguladoras.

Las limitaciones en la elaboración de la investigación incluyen, la ausencia o falta de actualización de la metadata en las CIG disponibles tales como, la capa de estructuras para precisar la densidad de población en las ComSAS y el límite geográfico de sectores

para identificar las ComSAS por municipios. La disponibilidad de datos actualizados dará resultados más precisos a nivel de municipios y subcuencas, sin embargo, a nivel de cuenca, resultó factible tener un cuadro de las áreas de mayor riesgo.

Por lo antes expuesto, se concluye que el tema de la investigación es de relevancia académica en el tema del impacto y manejo de los pozos sépticos domésticos, y aporta a la comunidad científica, dando espacio a desarrollar, explorar o ampliar investigaciones relacionadas a la contaminación de agua, tomando como base el modelo de priorización, para facilitar la toma de decisiones en el proceso de cumplir con la ley de agua limpia y mejorar la calidad de agua en las cuencas hidrográficas. Al ejecutar el modelo, se recomienda actualizar la data de las comunidades seleccionadas y sus alrededores, en vista de que, el escenario cambia con el desarrollo de proyectos de infraestructura y es necesario evaluar los resultados de los mapas geoespaciales a la luz de las realidades existentes. Los agradecimientos están dirigidos a quienes contribuyeron con su apoyo para la realización de esta investigación.

Referencias

- Autoridad de Acueductos y Alcantarillados (1984). Normas para el diseño de sistemas de alcantarillado sanitario, *Reglamento de Normas de Diseño*, número 3149, pp. IV-1. Puerto Rico. Autoridad de Acueductos y Alcantarillados.
- Bravo, L., Reyes V., Moreno, R., Alatorre, L., Torres, M., Granados, A., Fuentes, H. (2020). Cambios del uso del suelo e impactos en la escorrentía potencial de la cuenca Chuviscar-Sacramento (Chihuahua, México). Modelización con el método de Número de Curva. *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 26, 69–91. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.669>
- Crisóstomo, L. (2021). *Análisis multicriterio con ArcGIS*. MasterLive. <https://www.youtube.com/watch?v=wDvqbPktaE8&t=3357s>
- Corp of Engineers (2021a). *HEC-HMS, downloads, version 4.2.1* [HEC-HMS, descargas, versión 4.2.1]. US Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.
- Corp of Engineers (2021b). *HEC-RAS Version 6.0* [HEC-RAS descargas, versión 6.0]. US Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2016). *Plan Integral de Recursos de Agua de Puerto Rico: Aprobado de 13 junio de 2016*. Puerto Rico..

- Departamento de Recursos Naturales y Ambientales. (2020). *Informe Ingegrado 305(b)/303(d)*. Puerto Rico.
- Environmental Protection Agency. (2011). *Rio la Plata and Rio Grande de Loiza Watersheds: Final Report Phase III*. USA. Environmental Protection Agency: Watershed Stewardship Program, Caribbean Division.
- Environmental Protection Agency. (2019). *Summary of the Clean Water Act* [Resumen de la Ley de Agua Limpia]. USA. <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-water-act>
- Environmental Protection Agency. (2021). *Geospatial Resources at EPA* [Recursos Geoespaciales en la EPA]. USA. <https://www.epa.gov/geospatial>
- Federal Emergency Management Agency. (2021). *Mapas de Inundación*. Puerto Rico. Junta de Planificación. <http://maps.jp.pr.gov/index.php/como-buscar-en-los-mapas-de-niveles-de-inundacion/>
- Junta de Calidad Ambiental. (2015). *Puerto Rico Non Point Source Management Program* [Programa de Manejo de Fuentes Dispersas de Puerto Rico]. Puerto Rico.
- Junta de Planificación. (2015). *Memorial del Plan de Uso de Terrenos*. Puerto Rico. [http://gis.jp.pr.gov/Externo_Econ/Otros%20-%20PUT/2015_Dic/Memorial%20PUT%20\(para%20busqueda\).pdf](http://gis.jp.pr.gov/Externo_Econ/Otros%20-%20PUT/2015_Dic/Memorial%20PUT%20(para%20busqueda).pdf)
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). *NOAA Atlas 14 point precipitation frequency estimates* [Estimaciones de frecuencia de puntos de precipitación del Atlas 14 de la NOAA]. USA. Department of Commerce. https://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/pfds_map_pr.html
- Natural Resources Conservation Service. (1999). *Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55* [Hidrología Urbana para Cuencas Pequeñas TR-55]. USA. Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf
- Natural Resources Conservation Service. (2021). *GIS Coverage* [Covertura del SIG]. USA. Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/national/technical/nra/nri/results/?cid=nrcs143_013691
- Natural Resources Conservation Service. (2022). *Hydrologic Soil Groups* [Grupos de suelos hidrológicos]. USA. Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr12/tr/?cid=nrcs144p2_027279
- Oganización Mundial de la Salud. (2017). *Enfermedades Diarreicas*. <http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diarrhoeal-disease>

- PR.GOV (2020). *Portal de datos geográficos gubernamentales*. Puerto Rico. Portal Oficial del Gobierno. <https://gis.pr.gov/Pages/default.aspx>
- Quiñones, F. (2022). *Pozos sépticos y sus decargas de agua sanitarias*. Recursos de Agua de Puerto Rico. <http://www.recursosaguapuertorico.com/Pozos-S-pticos.html?fbclid=IwAR33Dw7LKKC-kSQJ7vMwzgujSZOT7isnABGLEaJwj5bCPBlaoQEQFPF8J2c>
- SDC-PR (2020). *Censo decenal de población y vivienda*. Instituto de Estadísticas. Puerto Rico. <https://censo.estadisticas.pr/EstimadosPoblacionales>
- Sevillano M. (2020). Zonificación de la amenaza ante inundaciones a partir de un método de evaluación multicriterio en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia, *GeoFocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, n° 25, p. 47-76, <http://dx.doi.org/10.21138/GF.661>
- Soderberg, C. (2014). Comunidades que carecen de alcantarillado sanitario: Talón de Aquiles de la salud pública puertorriqueña. *Perspectivas en Asuntos Ambientales*, 3, 18-25.
- Vázquez, D. Murillo, L., e Iglesias, A. (2020). El Cólera. *Revista Medicina*. 42(2), 226-239 <https://revistamedicina.net/ojsanm/index.php/Medicina/article/view/1517/1920>
- Unites States Geological Service. (2021) *Current Water Data for Puerto Rico* [Datos Actuales del Agua para Puerto Rico]. USA. Department of the Interior. <https://waterdata.usgs.gov/pr/nwis/rt>

La Revista Umbral es la revista inter y transdisciplinaria sobre temas contemporáneos del Recinto de Río Piedras de la Universidad de Puerto Rico. Forma parte de la plataforma académica Umbral, auspiciada por la Facultad de Estudios Generales y el Decanato de Estudios Graduados e Investigación. Promueve la reflexión y el diálogo interdisciplinario sobre temas de gran trascendencia, abordando los objetos de estudio desde diversas perspectivas disciplinarias o con enfoques que trasciendan las disciplinas. Por esta razón, es foro y lugar de encuentro de las Ciencias Naturales, las Ciencias Sociales y las Humanidades. Sus números tienen énfasis temáticos, pero publica también artículos sobre temas diversos que tengan un enfoque inter o transdisciplinario. La Revista Umbral aspira a tener un carácter verdaderamente internacional, convocando a académicos e intelectuales de todo el mundo. La Revista Umbral es una publicación arbitrada que cumple con las normas internacionales para las revistas académicas. Está indexada en [Open Journal Systems](#), [Latindex](#) y [REDIB](#).

Disponible en umbral.uprrp.edu

La Revista Umbral de la Universidad de Puerto Rico Recinto de Río Piedras
está publicada bajo la [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](#)