

TÉCNICAS DE SIG APLICADAS A ESTUDIOS DE ZONAS COSTERAS Y CUENCAS HIDROGRÁFICAS EN LA ISLA DE PUERTO RICO

P. MÉNDEZ-LÁZARO¹, J. NORAT-RAMIREZ¹ E.A. HERNÁNDEZ-DELGADO²,
L. CORDERO-RIVERA¹, A. NIEVES-SANTIAGO¹

¹ Universidad de Puerto Rico, Escuela Graduada de Salud Pública, Departamento de Salud Ambiental. Recinto de Ciencias Médicas PO Box 365067, San Juan, Puerto Rico 00936-5067. pablo.mendez1@upr.edu; jose.norat@upr.edu; lyz_a_c@yahoo.com; alejandro.nieves1@upr.edu

² Universidad de Puerto Rico, Centro de Ecología Tropical Aplicada y Conservación, Grupo de Investigación en Arrecifes de Coral, Apt. 23360, San Juan, Puerto Rico 00931-3360 coral_giac@yahoo.com

RESUMEN

Este trabajo tiene el propósito de presentar la metodología de los SIG utilizada para determinar el impacto de la contaminación bacteriológica de origen disperso en los arrecifes de coral (*Acropora palmata*) de la Reserva Marina Tres Palmas, al oeste de Puerto Rico. Dicho proyecto constó de 12 viajes de campo distribuidos a lo largo de un año y en los cuales se tomaron muestras de calidad de agua costera. Para la caracterización de corales se han utilizado transectos circulares con radio de 5,6 m en distintos puntos de la Reserva de cara a evaluar el impacto ecológico de la contaminación bacteriológica. Los datos colectados incluyen diversos parámetros de la especie (ej. % cobertura tejido vivo, % mortandad antigua, % mortandad reciente y otras condiciones). Los SIG permitieron delimitar sub-cuencas cercanas a la Reserva marina donde existen fosas sépticas y donde las comunidades locales no cuentan con servicio de alcantarillados sanitarios para las aguas usadas.

Palabras clave: SIG, arrecifes de coral, calidad de agua, cuencas hidrográficas, Reserva marina, Puerto Rico

GIS TECHNIQUES APPLIED TO STUDIES OF COASTAL ZONES AREAS AND WATERSHEDS IN THE ISLAND OF PUERTO RICO

ABSTRACT

This paper aims to present the GIS methodology used to determine the impact of bacterial contamination from non-point sources in coral reef (*Acropora palmata*) in the Tres Palmas Marine

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

Reserve, west of Puerto Rico. The project consisted of 12 field trips distributed throughout the year in which samples for coastal water quality were taken. To characterize coral reefs transects, were used 5.6m radius circular areas in different parts of the reserve to assess the ecological impact of bacteriological contamination. The data collected include various parameters of the species (eg. % lives tissue coverage, % ancient mortality, % recent mortality and other conditions). GIS allowed us to identify sub-basins near the marine reserve where there are septic tanks and where local communities have no wastewater service for sanitary sewage.

Keywords: GIS, coral reefs, water quality, watersheds, marine reserve, Puerto Rico

1. Introducción

Puerto Rico cuenta con un patrimonio cultural y natural muy valioso en sus zonas marinas y costeras, destacando diversas zonas de manglares, lagunas, estuarios, comunidades de hierbas marinas, planicies de algas y arrecifes de coral. Los arrecifes de coral son ecosistemas marinos complejos que albergan una gran diversidad de especies ([figura 1](#)), comparados en muchas ocasiones con grandes ciudades del mundo o las selvas tropicales debido a la riqueza de especies y a la cantidad de individuos que cohabitan, entre ellos esponjas, múltiples invertebrados y peces, muchos de ellos de gran importancia comercial. El valor principal de estos ecosistemas radica en sostener una biodiversidad amplia, en sostener las pesquerías más importantes de muchos países tropicales, en constituir una fuente de productos naturales con valor farmacológico, en funcionar como un rompeolas natural que brinda protección a la costa frente al impacto del oleaje de huracanes, en tener un rol vital como sumidero de dióxido de carbono atmosférico, y en constituir una fuente sustancial de ingresos para muchos países debido a los beneficios derivados de las pesquerías y su valor turístico y recreativo (Hernández Delgado, 2005).

Mayormente, los ecosistemas de arrecifes de coral adyacentes a la costa están influenciados por una serie de procesos que están a su vez altamente influenciados por los cambios en los patrones de usos de suelo y relacionados con el impacto y magnitud de las descargas terrestres a través de las cuencas hidrográficas que drenan en la costa (Golbuu *et al.*, 2011). Las cuencas hidrográficas son áreas de captación que integran todas las aguas superficiales dentro de un sistema de drenaje natural y cumplen un papel importante como fuente de alimento, abastecimiento de agua, energía, recreación, transporte de sedimento y nutrientes (Méndez-Lázaro, 2011). Debido al impacto combinado de muchos de estos factores, la degradación ambiental en las zonas costeras de la isla se ha incrementado significativamente durante los años recientes (Hernández Delgado y Sandoz Vera, 2011; Seguinot y Méndez, 2009). De esta manera, muchas de las actividades humanas en las cuencas hidrográficas han estado muy bien documentadas y se entiende que son causantes de la degradación de arrecifes costeros (Bonkosky *et al.*, 2009; Hernández Delgado *et al.*, 2010, en prensa) y afectan adversamente a poblaciones de organismos marinos de alto valor ecológico, económico y cultural (Wolansky *et al.*, 2004; 2009).

Los efluentes contaminados de los alcantarillados sanitarios y pluviales, los fertilizantes químicos y los pesticidas, así como todo tipo de desechos humanos descargan en las aguas costeras después del recorrido por las áreas de drenajes. En el municipio de Rincón, localizado al noreste de

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

Puerto Rico, estas descargas de agua añaden mayor contaminación a la gran cantidad de materiales orgánicos que alcanzan los ríos y quebradas que desembocan en la costa.

Los corales cuerno de alce (*Acropora palmata*) y cuerno de ciervo (*A. cervicornis*) son especies que se encuentran desde el 2006 en la lista de especies amenazadas bajo la Ley Federal de Especies en Peligro de Extinción de los Estados Unidos de América, incluyendo a Puerto Rico. Una de las poblaciones remanentes más importantes de *A. palmata* en todo el noreste del Caribe se encuentra en la Reserva Marina Tres Palmas (RMTP) en Rincón. Entre las principales preocupaciones ambientales de la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA), y del Departamento de Recursos Naturales y Ambientales de Puerto Rico (DRNA), está la disminución crónica de la calidad del agua asociada a las descargas de escorrentías turbias recurrentes y la contaminación de aguas residuales.

La Junta de Calidad Ambiental (JCA), agencia estatal encargada del monitoreo de la calidad del agua, y la organización no gubernamental sin fines de lucro *Surfrider Foundation* – Capítulo de Puerto Rico – han realizado un esfuerzo de monitoreo de la calidad microbiológica del agua en las costas de Rincón. Sin embargo, ninguno de dichos esfuerzos ha logrado documentar qué relación existe entre la calidad microbiológica del agua en la costa, los cambios en los patrones de uso del suelo y los cambios en la condición de los arrecifes de coral en la RMTP. Basado en lo mencionado anteriormente, el objetivo principal de este trabajo fue validar la metodología para determinar el impacto de la calidad del agua en las comunidades de arrecifes de coral en la RMTP utilizando diversas técnicas y entre ellas un análisis de cuencas con Sistemas de Información Geográfica (SIG). Con dicha herramienta se estudiaron las redes fluviales perennes e intermitentes que discurren por el municipio de Rincón y que drenan sus aguas en la Reserva marina.

2. Área de estudio

El área de estudio comprende la RMTP en su totalidad, el municipio de Rincón y las cuencas hidrográficas principales aledañas, el área costanera, y la zona comprendida entre Quebrada Piletas y Quebrada Los Ramos ([figura 2](#)). La superficie emergida próxima a la Reserva abarca la cuenca principal Área Costanera Quebrada Piletas a Quebrada Los Ramos. Ésta es la unidad hidrológica más occidental de la isla grande de Puerto Rico y tiene una superficie de 11,1 km². Cuenta con un relieve muy accidentado, con varios cauces, algunos perennes y en su gran mayoría intermitentes que drenan grandes cantidades de agua en episodios de lluvia considerables. También cabe mencionar que el área de la RMTP recibe la escorrentía pluvial superficial de las colinas de los barrios Punta y Ensenada. La Reserva marina tiene un área de 83 hectáreas con una orientación de norte a sur. Incluye 1180 metros lineales de costa y se extiende hasta el borde de la plataforma insular a unos 20 metros de profundidad. El área de la Reserva Marina es considerada patrimonio del Pueblo de Puerto Rico según estipula el artículo 6 de la Ley Número 17, apéndice 1. Los terrenos costeros aledaños a la Reserva son de propiedad privada. Algunos de estos terrenos tienen desarrollo agrícola (ganadería) y otros desarrollos de viviendas privadas o urbanizaciones (Valdés Pizzini *et al.*, 2008).

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

La fauna de la Reserva está compuesta mayormente por organismos marinos, invertebrados, peces, tortugas, mamíferos y aves. Según García *et al.* (2004) se reportaron al menos 30 especies de coral y octocoral en la RMTP. Sin embargo, el estudio presente ha revelado sobre 40 especies de corales (Hernández Delgado, datos no publicados). La especie de coral más prominente en la zona cercana a la costa de la RMTP es el coral Cuerno de Alce (*Acropora palmata*) que se encuentra en las partes más someras en densidades altas.

Cabe destacar que el municipio de Rincón no cuenta con una densidad poblacional alta, no obstante, dicha característica está siendo amenazada desde las últimas décadas debido a las diversas propuestas para urbanizar muchas de sus áreas rurales y terrenos adyacentes a la costa. Hoy día se encuentra bajo mucha presión urbanística por parte de los contratistas/desarrolladores que quieren construir para satisfacer la supuesta demanda turística del municipio.

3. Materiales y métodos

3.1 Datos y metodología para análisis de cuencas con Sistemas de Información Geográfica

Los hidrólogos utilizan diversas fuentes de información y datos para determinar la calidad del agua, la disponibilidad del recurso, prevenir inundaciones, entender los asuntos ambientales del entorno y manejar los recursos hídricos (Maidment, 2002). En este trabajo se utilizan modelos de elevación digital (*DEM*) de alta resolución y la tecnología de los SIG para adquirir una serie de datos sobre las cuencas hidrográficas. Se construyó una caracterización hidrológica del área de estudio con el objetivo de poder identificar las áreas de drenaje que puedan tener impacto en la Reserva Marina. Para ello, a través de "Web Coverage Service" del *Open Geospatial Consortium* y la Guía para acceder a servicios de datos geospaciales en formato estándar, se obtuvieron los cuadrángulos de los DEM en la Oficina de Gerencia y Presupuesto para el oeste de Puerto Rico (figura 3). El DEM de alta resolución (5 x 5 metros) se basa en datos de elevación del modelo digital de terreno (MDT) del mapa base planimétrico del Centro de Recaudación de Ingresos Municipales (CRIM) para el 1996-98. La escala de los mapas planimétricos es de 1:2.000. El modelo se derivó a partir de los puntos de elevación (*mass points*) y las hondonadas: ríos, canales, cortes de carreteras y remociones de terreno, además de las crestas naturales de las montañas procesado en 2009.

También se recopiló el banco de datos geoespacial del *National Hydrography Dataset* (NHD) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estos son datos digitales vectoriales para ser utilizados en SIG. Los mismos contienen características de cuerpos de agua así como lagos, embalses, ríos, canales, entre otros, creados para análisis de recursos hídricos superficiales. Se utilizó el programa de SIG *ArcGIS 9.3* y la herramienta HEC v.5.0. *Geospatial Hydrologic Modeling GeoHMS*. La herramienta HEC v.5.0 permite visualizar la información espacial, documentar las características de las cuencas hidrográficas, trabajar con análisis y estadísticas espaciales, delimitar sub-cuencas, ríos, quebradas y riachuelos. *ArcHydro* es un modelo de datos geoespaciales y temporales de los recursos hídricos que opera dentro de *ArcGIS* y es una estructura

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

de datos que apoya los modelos de simulación hidrológica, aunque no es en sí un modelo de simulación (Maidment, 2002).

En el NHD del Servicio Geológico Federal se clasifican las capas de información por medio de los *Hydrologic Unit Codes-HUC* (Zitello *et al.*, 2008). En el caso de la isla de Puerto Rico, en el NHD se dividieron las capas de información en cuatro secciones que responden a los cuatro puntos cardinales de la isla. Debido a nuestro interés en el área específica de la cuenca de Rincón se seleccionó la división del NHD del área oeste la cual es identificada como HUC8-21010003. Dentro de este paquete de capas de información, nuestro mayor interés giró en torno a la capa de información de NHD *Flowline*, la cual describe por medio de líneas la presencia de flujo de ríos o quebradas principales ([figura 5](#)).

Lamentablemente, el NHD del área oeste de Puerto Rico no ofrece los detalles necesarios que brinde con exactitud todos los posibles flujos de agua superficial. Por ello fue necesario la creación e incorporación de otras capas de información que nos permitieran evaluar la superficie y así poder desarrollar un proceso de análisis que como resultado ofrezca una mayor precisión en la existencia de flujos superficiales. Para identificar los puntos de drenaje que tuviesen algún tipo de influencia en el área de interés de la cuenca hidrográfica de Rincón, fue necesaria la creación de una metodología que según Rollo y Robin (2010) puede ser obtenida mediante la identificación de la mayoría de las sub-cuencas con mayor influencia en los flujos de drenaje principales. Con esto se estableció la necesidad de llevar a cabo varios análisis precursores a la creación de las sub-cuencas utilizando como punto de partida la capa de información del DEM, que según Saghafian *et al.* (2000) dan paso a la creación de la dirección del flujo (*flow direction*) y las características o definiciones del cauce (*stream definition*). En el desarrollo de las capas de información se creó el *flow direction*, el cual establece la dirección del flujo de agua superficial.

Como próximo paso se desarrolló la capa de *stream definition* en donde fue necesario establecer el umbral para el área de interés en km² y se creó con dos distintos valores para lograr obtener la definición de las sub-cuencas de mayor influencia en la cuenca principal y con el propósito de obtener la mayor definición de líneas de drenaje ([figura 6](#)) (Burcher, 2009). Finalmente se obtuvieron las dos capas de información, por medio del análisis de *catchment grid delineation*, las cuales presentan gráficamente la distribución de las sub-cuencas dentro de la cuenca principal Área Costanera Quebrada Piletas y Quebrada Los Ramos.

Debido al interés de generar análisis multi-paramétricos en el futuro utilizando la distribución de las sub-cuencas, fue necesario crear una capa de información en formato vectorial por medio del análisis de *catchment polygon processing* ([figura 7](#)). Esto se llevó a cabo con las capas generadas en el paso anterior, que permite la creación de polígonos que facilitan la incorporación de información a la tabla de atributos de cada sub-cuenca. De esta manera, se han identificado los cuerpos de agua con impacto directo y que drenan sus aguas en la Reserva a la vez que conocemos su superficie, área de captación ([tabla 1](#)) y con fotos aéreas contabilizar el número total de infraestructuras con fosas sépticas por km².

3.2 Protocolo para análisis de calidad de agua bacteriológica en el laboratorio

Dicho proyecto constó de 12 viajes de campo aproximadamente. Estos viajes se distribuyeron a lo largo del año y en los mismos se tomaron muestras de calidad de agua. Se estableció un total de nueve estaciones de muestreo de la calidad microbiológica del agua (figura 4). Cuatro de estas estaciones se encuentran localizadas dentro de la RMTP. Las cinco restantes son las estaciones control fuera de la RMTP y se localizaron en áreas adyacentes. Durante cada visita se colectaron triplicados de muestras de agua a las cuales se les determinó la densidad de coliformes fecales y enterococos utilizando el Método de Filtración de Membrana 9222D y 9230C, respectivamente (APHA, 1995). Además, se procesaron muestras de calidad de agua para llevar a cabo análisis de biología molecular utilizando una adaptación del Método B (EPA, 2010) para determinar la densidad de *Bacteroides*, microorganismo anaeróbico también de origen fecal. La presencia de estos microorganismos sugiere que ha ocurrido contaminación fecal y que puede haber organismos patógenos peligrosos presentes. Los enterococos resisten la desinfección con cloro durante el proceso de tratamiento de aguas usadas y pueden tolerar condiciones ambientales adversas tales como temperaturas altas o bajas, deshidratación, salinidad y luz solar. Por esta razón, sobreviven por periodos más largos en el ambiente marino. Por último, los *Bacteroides* se encuentran principalmente en las heces fecales de origen humano y son resistentes a diferentes condiciones ambientales.

El método de filtración para coliformes fecales utiliza un medio altamente selectivo (medio coliformes fecales), rico en lactosa, con una temperatura de incubación determinada y el reactivo ácido rosólico para detectar la presencia de estos microorganismos. El periodo de incubación es de 22 a 26 horas a una temperatura de $44,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$. El cálculo de la densidad de coliformes fecales se reporta en unidades formadoras de colonias (ufc) por 100 mL. Una muestra representativa de las colonias que se forman se utiliza para verificar el crecimiento de coliformes fecales. Esto se realiza mediante el Método del Número más Probable 9221 C (APHA, 1995). Este método utiliza el caldo de lauril triptosa como medio selectivo. La presencia de coliformes fecales en este medio se confirma por medio de la producción de gas luego de 24 horas de incubación a una temperatura de 35°C .

El método de filtración para enterococos fecales utiliza un medio selectivo (medio enterococos) donde crecen estreptococos fecales. El periodo de incubación es de 46 a 50 horas a una temperatura de $35 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. El cálculo de la densidad de enterococos se reporta en ufc por 100 mL. Una muestra representativa de las colonias que crecen en el medio selectivo se usa para la verificación de las colonias. Este procedimiento permite diferenciar entre estreptococos y enterococos. Se utilizan diferentes medios selectivos para este análisis que incluyen el agar y el caldo de infusión de cerebro y corazón, el caldo de infusión de cerebro y corazón con cloruro sódico (NaCl) al 6,5% y el agar bilis esculina. El crecimiento de cocos gram-positivos, catalasa negativos en el agar bilis esculina confirma que la colonia es del grupo de los estreptococos fecales. El crecimiento de cocos gram-positivos a 45°C en el caldo de infusión de cerebro y corazón confirma también que la colonia es del grupo de los estreptococos fecales. El crecimiento de cocos gram-positivos a 45°C en el caldo de infusión de cerebro y corazón con 6,5% de NaCl indica que la

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

colonia pertenece al grupo de los enterococos diferenciándolos de los estreptococos. La diferencia en densidad de estos organismos indicadores de contaminación fecal entre las estaciones de muestreo de aguas costeras implica una mayor descarga de contaminantes fecales a través de las quebradas más cercanas a dichas estaciones.

3.3 Datos obtenidos para evaluar las poblaciones de arrecifes de coral (*Acropora palmata*)

Para evaluar el impacto ecológico de la contaminación bacteriológica en los arrecifes de coral y caracterizar el estado de las poblaciones del coral Cuerno de Alce (*Acropora palmata*) y de otros corales Acropóridos, se utilizaron 53 transectos circulares con radio de 5,6 m (área = 100 m² c/u) en distintos puntos dentro y fuera de la Reserva. Estos se seleccionaron aleatoriamente utilizando las capas de información de categorías bénticas y de batimetría en SIG. Los datos colectados incluyeron diversos parámetros de la especie (ej. largo, ancho y alto máximo, % cobertura tejido vivo, % mortandad antigua, % mortandad reciente, % blanqueamiento (si alguno), % frecuencia enfermedades, abundancia de peces damiselas territorialistas (familia Pomacentridae), caracoles coralívoros (*Coralliophila abbreviata*) y gusanos de fuego coralívoros (*Hermodice carunculata*)), así como cualquier otra condición (ej. colonias fragmentadas, colonias fragmentadas pero reestablecidas en el fondo, impactos de sedimentos, etc.).

4. Resultados

Una vez conocidos los cuerpos de agua que descargan en la Reserva, se pudo explicar con mayor claridad la procedencia de ciertos contaminantes. Utilizando la base de datos de la Autoridad de Acueductos y Alcantarillados de Puerto Rico (AAA), se logró identificar cuáles residencias estaban conectadas a los sistemas de alcantarillados sanitarios y cuáles no. Esta caracterización hidrológica construida nos permitió identificar y delimitar sub-cuencas cerca de la Reserva marina donde hay fosas sépticas y las comunidades locales no tienen servicio sanitario para las aguas residuales. Las fosas sépticas son utilizadas ampliamente en todo el mundo, particularmente para las viviendas que no tienen acceso al drenaje principal sanitario. Sin embargo, muchos de los tanques y fosas sufren de una serie de problemas comunes, principalmente asociados con su mala ubicación, falta de mantenimiento, drenaje inadecuado o deficiencias en el diseño que pueden afectar la calidad de los cuerpos de agua adyacentes (Butler y Payn, 1995).

En cuanto a los corales y a la calidad del agua, se ha evidenciado preliminarmente un gradiente muy evidente de disminución en la densidad de corales *Acropora palmata* de valores promedio de 25,9 colonias por 100 m² en la zona central (Medio-R) de la Reserva donde descarga la sub-cuenca *Steps* (de poca densidad urbanística) y de 25,6 colonias por 100 m² en la zona noreste (NR) de la misma, donde descargan las sub-cuencas Casa China, Norte Casa China y Reserva NE1 ([figura 8a](#)). Sin embargo, dichos valores disminuyeron a 10,4 por 100 m² en la zona sur de la Reserva y a 12,4 por 100 m² en la zona de la estación Control Sur. No se documentaron corales en la estación control playa. Esta zona recibe descargas de las cuencas Rampa de los Pescadores y Vista Azul, las cuales reciben mayores efluentes urbanos. Igualmente, se documentó una disminución significativa en el área superficial promedio de las colonias siguiendo un gradiente de

norte (1,8 m²) a sur (0,8 m²) dentro de la Reserva y hacia la zona Control Sur (0,3 m²) ([figura 8b](#)). El por ciento de cobertura de tejido vivo por colonia fluctuó entre 57 y 75% entre las diversas zonas analizadas, y fluctuó principalmente en función del tamaño de la colonia. La cobertura disminuyó en los corales de mayor antigüedad los cuales han estado expuestos a un número mayor de perturbaciones que aquellos corales más jóvenes, los cuales numéricamente predominan hacia la zona sur de la Reserva ([figura 8c](#)). Finalmente, se observó una tendencia de incremento en la prevalencia de mortandad reciente en las colonias hacia la zona sur de la Reserva y en la zona control sur ([figura 8d](#)). Esto se debe principalmente a una condición conocida como necrosis de parches. La misma es una enfermedad letal de origen microbiano que causa la pérdida rápida de parches de tejido vivo de diverso tamaño en las colonias.

El gradiente de condiciones en *Acropora palmata* refleja inequívocamente una relación con el gradiente de contaminación fecal del agua en función a las descargas de agua en la zona de la RMTP o en la zona adyacente a ésta. El centro de la Reserva, al igual que el sur, según se ha identificado en los mapas, en análisis de laboratorio y en el trabajo de campo, se encuentra justo cerca de varios arroyos intermitentes que descargan aguas turbias y contaminadas con el pasar de fuertes episodios de lluvia. Esta información se hace evidente en la [figura 9](#) en la cual se observa un mapa de interpolación y la distribución espacial de enterococos basada en valores promedios. Cabe mencionar que en el área sur de la **Reserva** descargan las sub-cuencas Rampa de Pescadores y Vista Azul, siendo ambas las de mayor densidad urbanística y con un total de 254 fosas sépticas en un área de 3,09 km².

En cuanto a la calidad bacteriológica del agua, se han observado valores en el área sureste de la Reserva que indican descargas de aguas contaminadas en las estaciones Control Sureste (C_SE) y Quebrada Club Náutico (Q_C_N) ([figura 10](#)). Estos puntos de muestreo quedan muy cercanos a las desembocaduras de las sub-cuencas Rampa de Pescadores y Vista Azul, siendo ésta última la sub-cuenca de mayor superficie que drena sus aguas cercanas a la Reserva. Estos resultados muestran un claro gradiente de mayor a menor calidad de agua desde el extremo noroeste de la **Reserva** hasta el extremo sureste. A medida que se acerca a la desembocadura de la quebrada Vista Azul y a la Rampa de Pescadores se deteriora la calidad del agua. Las sub-cuencas que desembocan en estos puntos contienen el mayor número de fosas sépticas del área de estudio según el análisis con SIG.

5. Conclusiones

De forma preliminar, la metodología aplicada nos ha permitido integrar distintas disciplinas (microbiología, ecología, hidrología y técnicas de SIG) para atender una situación de contaminación por fuentes dispersas en la zona costera del municipio de Rincón y en específico la RMTP. Se pudo establecer una variabilidad espacial de la contaminación bacteriológica que va orientada de norte a sur, como se observó anteriormente, siendo el sur de la Reserva el área más impactada por las descargas contaminadas. Igualmente, se documentó una disminución tanto en densidad como en el área superficial de las colonias del coral cuerno de alce (*Acropora palmata*) a lo largo del referido gradiente. Además, se documentó un incremento en la prevalencia de mortandad reciente en el tejido de las colonias con un incremento en la exposición de los corales a las aguas turbias y

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

contaminadas. Mientras, cabe destacar que se han encontrado los valores más elevados de coliformes y enterococos en la misma zona.

Con esta metodología se ha podido establecer las áreas de arrecifes de corales más impactadas y se ha documentado cartográficamente con gran certeza por dónde discurren las aguas de escorrentías antes de ser drenadas en las zonas costeras y donde drenan específicamente con respecto a la RMTP. De esta manera, basados en los resultados de este estudio quedan identificadas áreas de prioridad para atender la situación de contaminación bacteriológica que afecta la calidad del agua de la RMTP y los arrecifes. Siendo el área de la RMTP y los arrecifes dominados por *Acropora palmata*, una especie que se encuentra catalogada como amenazada bajo la Ley Federal de Especies en Peligro de Extinción en los EEUU y Puerto Rico, las autoridades competentes (ej. Junta de Calidad Ambiental, Junta de Planificación, Departamento de Salud) deben establecer medidas inmediatas para manejar adecuadamente los usos de los terrenos adyacentes a la RMTP y manejar así apropiadamente sus escorrentías contaminadas. Con las sub-cuencas recién delimitadas utilizando SIG se pueden sugerir áreas prioritarias de intervención para reducir significativamente la contaminación de las aguas costeras por parte de las descargas de fosas sépticas en las cuencas hidrográficas adyacentes a la RMTP.

En consecuencia, este estudio demostró que debe suministrarse más atención a la interacción entre la escala hidrológica y las zonas costeras. También se pone en evidencia que para proteger las zonas costeras no basta con delimitar un área protegida únicamente en la franja litoral y en el agua. Esto significa que manejar las actividades del litoral de manera integrada no sólo incluye la escala espacial administrativa (municipal, estatal o federal), sino también la natural en la red de drenaje y su entorno. En este asunto, la escala de cuenca hidrográfica toma protagonismo ya que en un principio parte en integrar los recursos hídricos y el terreno, tanto río arriba como río abajo, las aguas subterráneas y superficiales; y las áreas marinas. Es de conocimiento común que el manejo inapropiado del agua y su entorno pueden reducir la disponibilidad, la calidad, la cantidad del recurso y el disfrute del mismo. En el caso del manejo de los ecosistemas marinos tropicales como los arrecifes de coral puede significar la diferencia entre mantener su sustentabilidad, resiliencia, beneficios, servicios y valor socio-económico, ya de por sí amenazado por el calentamiento del mar y la acidificación marina asociado al cambio climático, o perderlo para siempre.

Agradecimientos

Agradecemos al Departamento de Recursos Naturales y Ambientales del Estado Libre Asociado de Puerto Rico y a la agencia federal *National Oceanographic and Atmospheric Administration* por el apoyo brindado a través del *Task CRI-9 PR CORAL REEFS AND WATERSHEDS STRATEGY*. De igual manera, se le agradece al Instituto Caribeño de Arrecifes de Coral de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez y a la Fundación Nacional para la Ciencia a través del proyecto NSF HRD 0734826 a través del Centro de Ecología Tropical Aplicada y Conservación de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras por el apoyo parcial brindado a E.A. Hernández Delgado.

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

Referencias bibliográficas

American Public Health Association (APHA) (1995): *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19th edition. Washington, DC: American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF).

Bonkosky, M., Hernández-Delgado, E.A., Sandoz, B., Robledo, I.E., Norat-Ramírez, J., y Mattei, H. (2009): "Detection of spatial fluctuations of non-point source fecal pollution in coral reef surrounding waters in southwestern Puerto Rico using PCR-based assays", *Marine Pollution Bulletin*, 58, 1, pp. 45-54.

Butler, D. y Payne, J. (1995): "Septic Tanks: Problems and Practice", *Building and Environment*, 30, 3, pp. 419-425.

Burcher, C.L. (2009): "Using simplified watershed hydrology to define spatially explicit 'zones of influence'", *Hydrobiologia*, 618, pp. 149-160.

Eakin, C.M., Morgan, J.A., Smith, T.B., Liu, G., Alvarez-Filip, L., Baca, B., Bouchon, C., Brandt, M., Bruckner, A., Cameron, A., Carr, L., Chiappone, M., James, M., Crabbe, C., Day, O., de la Guardia-Llanso, E., DiResta, D., Gilliam, D., Ginsburg, R., Gore, S., Guzmán, H., Hernández-Delgado, E.A., Husain, E., Jeffrey, C., Jones, R., Jordán-Dahlgren, E., Kramer, P., Lang, J., Lirman, D., Mallela, J., Manfrino, C., Maréchal, J.P., Mihaly, J., Miller, J., Mueller, E., Muller, E., Noordeloos, M., Oxenford, H., Ponce-Taylor, D., Quinn, N., Ritchie, K., Rodríguez, S., Rodríguez-Ramírez, A., Romano, S., Samhuri, J., Schmahl, G., Steiner, S., Taylor, M., Walsh, S., Weil, E., y Williams, E. (2010): "Caribbean corals in crisis: Record thermal stress, bleaching and mortality in 2005", *Plos One*, 5, 11, e13969. doi:10.1371/journal.pone.0013969.

García, J.R., Castro, R., Sabater-Clavell, J., y Carlo, M. (2004): *Baseline characterization and monitoring of coral reef communities at Isla Desecheo, Rincón and Mayagüez Bay, Puerto Rico*. Final report submitted to the Department of Natural and Environmental Resources of Puerto Rico, 89 pp.

Golbuu, Y., van Woesik, R., Richmond, R., Harrison, P. y Fabricius, K. (2011): "River discharge reduces reef coral diversity in Palau", *Marine Pollution Bulletin*, 62, pp. 824-831.

Haugland, R.A., Siefring, S.C., Wymer, L.J., Brenner, K.P. y Dufour, A.P. (2005): "Comparison of *Enterococcus* measurements in freshwater at two recreational beaches by quantitative polymerase chain reaction and membrane filter culture analysis", *Water Research*, 39, 4, pp. 559-568.

Hernández-Delgado, E.A., Sandoz, B., Bonkosky, M., Mattei, H., y Norat, J. (2010): "Impacts of non-point source sewage pollution in elkhorn coral, *Acropora palmata* (Lamarck), assemblages of the southwestern Puerto Rico shelf", *Proceedings of the 11th International Coral Reefs Symposium*, pp. 747-751.

Hernández-Delgado, E.A., y Sandoz-Vera, B. (2011): "Impactos antropogénicos en los arrecifes de coral", en J. Seguinot-Barbosa (Ed.): *Islas en Extinción: Impactos Ambientales en las Islas de Puerto Rico*. Cataño, PR, Ediciones SM, pp. 255.

Hernández-Delgado, E.A., Hutchinson-Delgado, Y.M., Laureano, R., Hernández-Pacheco, R., Ruiz-Maldonado, T.M., Oms, J., y Díaz, P.L. "Sediment stress, water turbidity and sewage impacts on

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

threatened Elkhorn coral (*Acropora palmata*) stands at Vega Baja, Puerto Rico", *Proceedings of the Gulf & Caribbean Fisheries Insititute*, 63 (en imprenta).

Hernández-Pacheco, R., Hernández-Delgado, E.A., y Sabat, A.M. (2011): "Demographics of bleaching in the Caribbean reef-building coral *Montastraea annularis*", *Ecosphere*, 2, 1, pp. 1-13, doi:10.1890/ES10-00065.1.

Hernández-Delgado, E.A. (2005): "Historia natural, caracterización, distribución y estado actual de los arrecifes de coral Puerto Rico", en, R.L. Joglar (Ed.): *Biodiversidad de Puerto Rico: Vertebrados Terrestres y Ecosistemas. Serie Historia Natural*. San Juan, PR, Editorial Instituto de Cultura Puertorriqueña, pp.563.

Maidment, D.R. (Ed.) (2002): *Arc Hydro. GIS for water resources*. California, ESRI Press. ISBN 13:978-1-58948-034-6.

Méndez-Lázaro, P. (2011): "Manejo integrado de recursos hídricos y zonas costeras", en *Cambios en los usos del suelo y los impactos hidrológicos*", *Boletín IBERMAR*, 5.

Méndez-Lázaro, P., Martínez-Fernández, J. (2010): "Análisis de tendencias hidroclimáticas en dos cuencas representativas de la isla de Puerto Rico", *Revista Geográfica de América Central*. Número Especial II Semestre 2010. ISSN 1011-48X 98-125.

Rollo, N., Robin, M. (2010): "Relevance of watershed modelling to assess the contamination of coastal waters due to land-based sources and activities", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86, pp. 518-525.

Saghafian, B.I., van Lieshout, A.M., y Rajaeil, H.M. (2000): "Distributed catchment simulation using a raster GIS", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2, 3/4, pp. 199-203.

Sanders, I.M., Barrios Santiago, J.C., Appeldoorn, R.S. (2005): "Distribution and relative abundance of humpback whales off Western Puerto Rico during 1995-1997", *Caribbean Journal of Sciences*, 41, pp. 101-107.

Seguinot Barbosa, J. y Méndez Lázaro, P. (2009): "Gestión del Litoral y Política Pública en Puerto Rico" en *Manejo Costero Integrado y Política Pública en Iberoamérica: Un diagnóstico*. Universidad de Cádiz, España, ISBN: 978-84-692-5175-1.

U.S Army Corps of Engineers (USCOE) (2010): *HEC-GeoHMS. Geospatial Hydrologic Modeling Extension*. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center.

U.S Department of Agriculture (USDA) (2008): The Puerto Rico GAP Analysis. *Volume 1: Land cover, vertebrate species distribution and land stewardship*. General Technical Report IITF-GTR-39, pp. 189.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (2010): *Method B: Bacteroidales in Water by TaqMan Quantitative Polymerase Chain Reaction (qPCR) Assay*. [Consulta: 28-02-2011]. Disponible en <http://water.epa.gov/scitech/methods/cwa/bioindicators/upload/methodb2010.pdf>

Valdés Pizzini, M., Scharrer Umpierre, M.T., Carrero Morales, C.J., Fernández Arriba, M. y Muñoz Hincapié, M. (2008): *Plan de Manejo de la Reserva Marina Tres Palmas, Rincón, Puerto Rico*.

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

Equipo de Facilitación del Centro Interdisciplinario de Estudios del Litoral (CIEL), Universidad de Puerto Rico en Mayagüez.

Wolanski, E., Richmond, R., McCook, L. (2004): "A model of the effects of land-based, human activities on the health of coral reefs in the Great Barrier Reef and in Fouha Bay, Guam, Micronesia", *Journal of Marine Systems*, 46, pp. 133-144.

Wolanski, E., Martínez, J. y Richmond, R. (2009): "Quantifying the impact of watershed urbanization on a coral reef: Maunaloa Bay, Hawaii", *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84, pp. 259-268.

Zitello, A.G., Whitall, D.R., Dieppa, A., Christensen, J.D., Monaco M.E. y Rohmann, S.O. (2008): "Characterizing Jobos Bay, Puerto Rico: A Watershed Modeling Analysis and Monitoring Plan", *NOAA Technical Memorandum NOS NCCOS*, 76, pp. 81.

TABLAS

Tabla 1. Superficie, área de captación y número de fosas sépticas construidas por subcuencas.

CUENCAS	AREA (Ha)	ELEV. MAX (m)	Número de Fosas Sépticas
Área Costanera Quebrada Piletas a Quebrada Los Ramos	1114	370	NA
Vista Azul	283	110	178
Norte Casa China	132	111	132
Casa China	52	94	9
Steps	38	104	20
Reserva NE1	35	93	9
Rampa Pescadores	26	82	76
Reserva NE2	17	86	2
∑ Sub-CUENCAS	583	n/a	426

Fuente. Elaboración propia.

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

FIGURAS

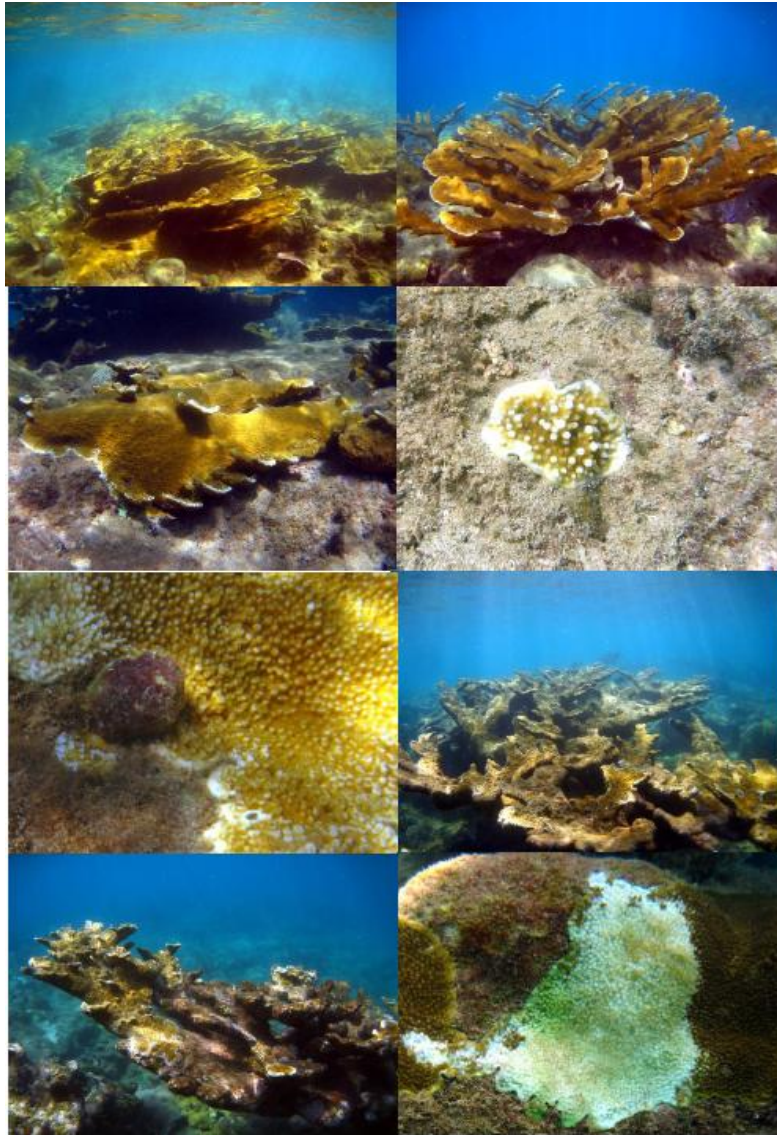


Figura 1. Colonias del coral Cuerno de Alce (*Acopora palmata*) en la Reserva Marina de Tres Palmas.

Fuente: Dr. Edwin A. Hernandez-Delgado

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

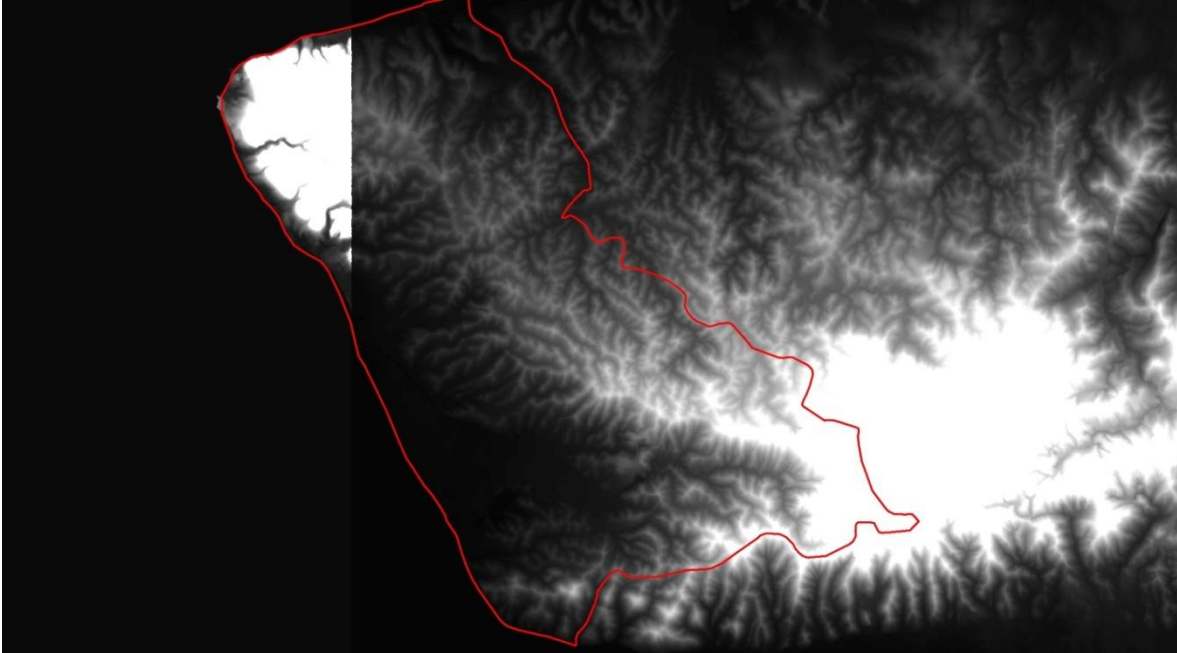


Figura 3. Modelo de elevación digital (DEM). Cuadrángulos Rincón ID 59 y Punta Higuera. Referencia especial 32161.

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

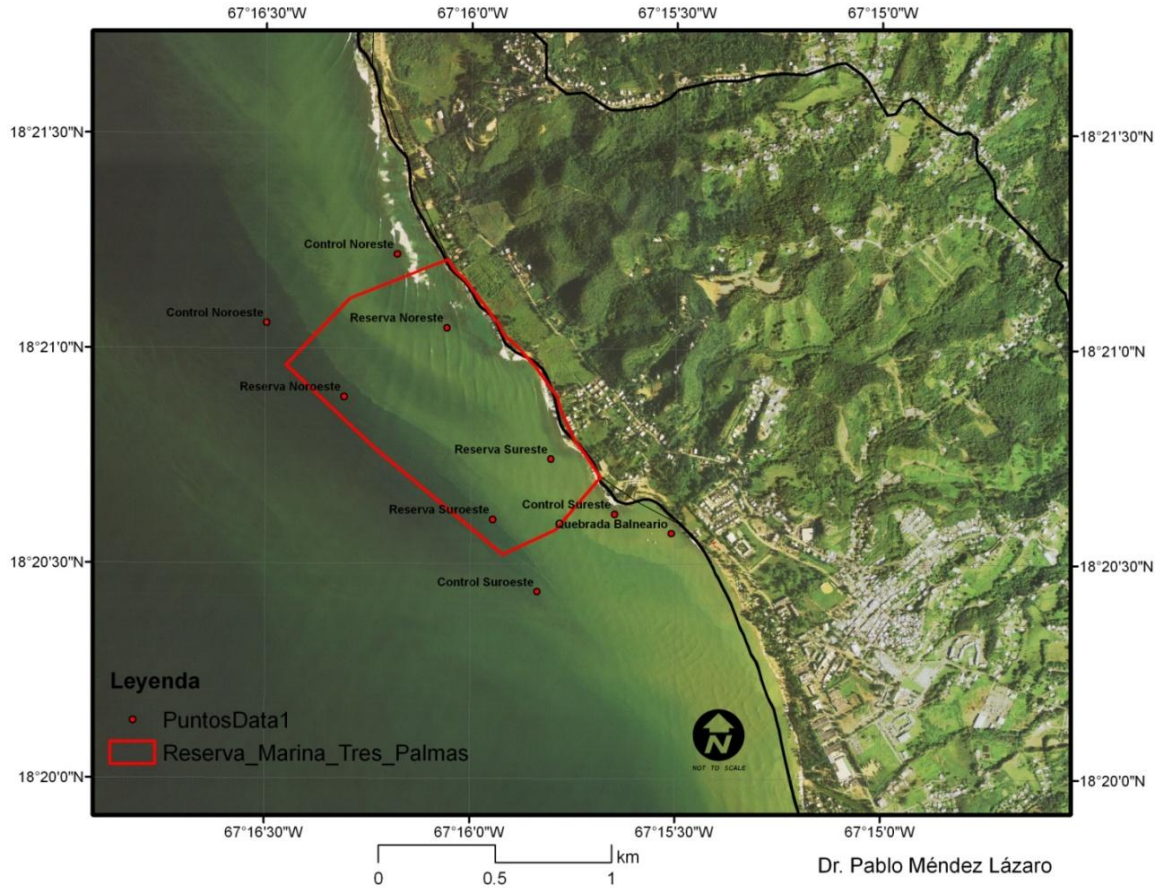


Figura 4. Reserva Marina Tres Palmas y puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, n° 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157



Figura 5. Relieve construido con los modelos de elevación digital y red hidrográfica en el municipio de Rincón.

Fuente: Elaboración propia: Datos y Capa de información *National Hydrography Dataset (NHD)*

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157



Figura 6. Ríos, quebradas y áreas de drenaje intermitentes contruidos con HEC-tool v.5.0.
Fuente: Elaboración propia

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

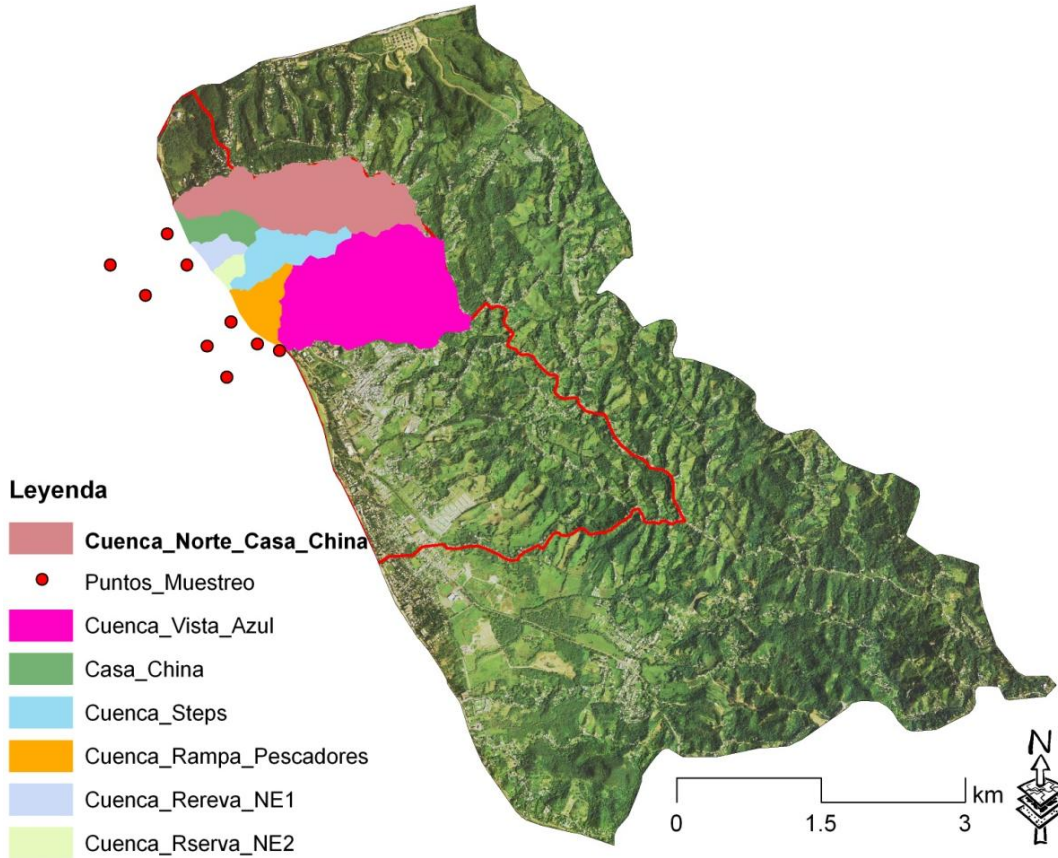


Figura 7. Municipio de Rincón, cuenca Área Costanera Quebrada Piletas a Quebrada Los Ramos y sub-cuencas que descargan en la Reserva Marina Tres Palmas.

Fuente: Elaboración propia

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

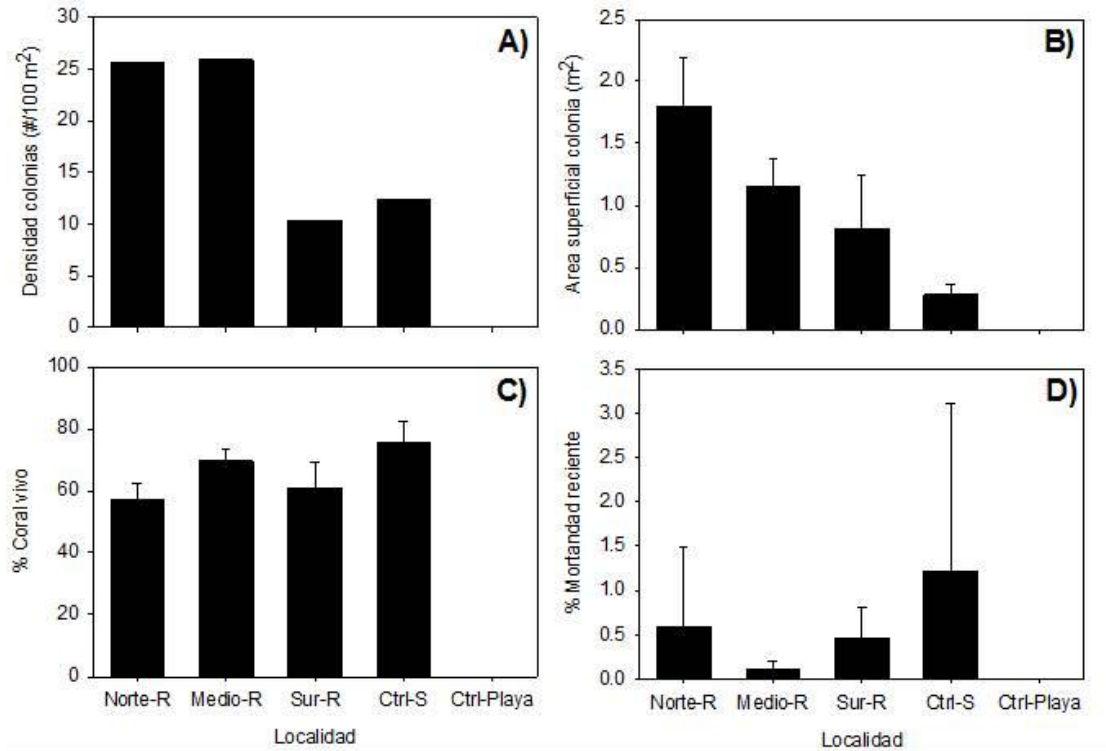


Figura 8. Parámetros poblacionales del coral Cuerno de Alce (*Acropora palmata*): A) Densidad total de colonias; B) Tamaño de las colonias; C) Porcentaje de tejido vivo en las colonias; y D) Porcentaje de mortandad reciente en las colonias.

Fuente: Elaboración propia

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

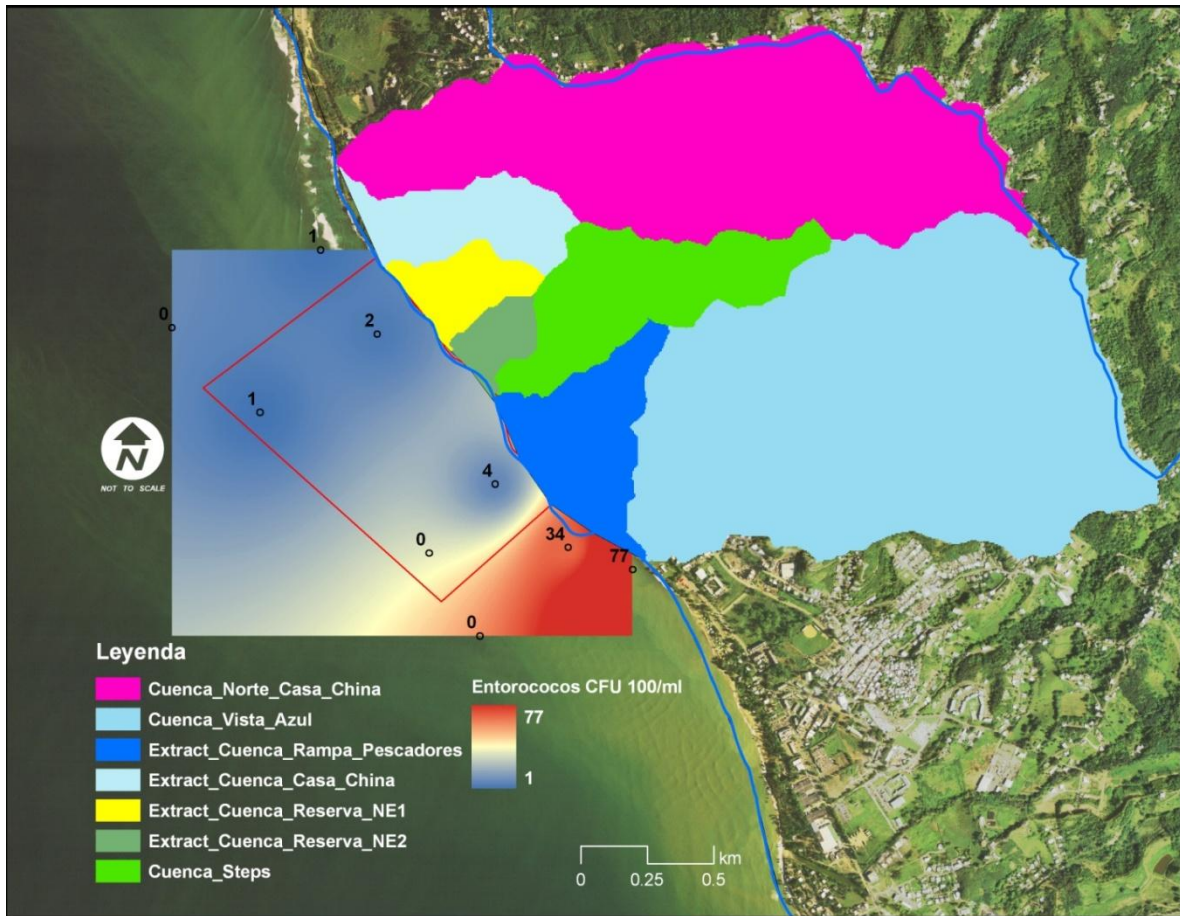


Figura 9. Interpolación de valores promedios y distribución espacial de enterococos en la costa del municipio de Rincón y la Reserva Marina Tres Palmas.

Fuente: Elaboración propia

Méndez-Lázaro, P., Norat-Ramírez, J., Hernández-Delgado, E. A., Cordero-Rivera, L. y Nieves-Santiago, A. (2012): "Técnicas de SIG aplicadas a estudios de zonas costeras y cuencas hidrográficas en la isla de Puerto Rico", *GeoFocus (Artículos)*, nº 12, p. 71-92. ISSN: 1578-5157

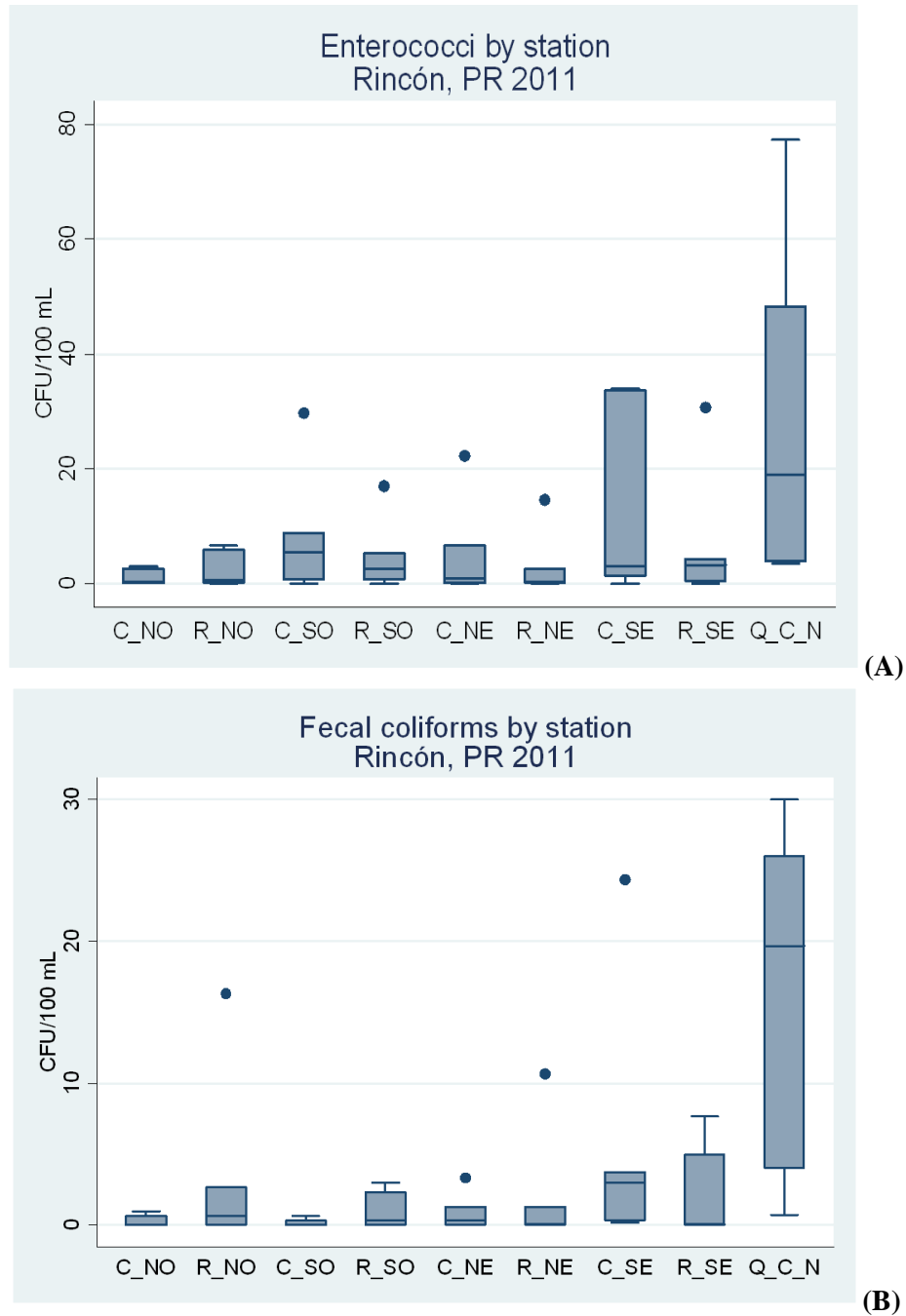


Figura 10. A) Medidas de tendencia central para enterococos por estación, B) Medidas de tendencia central para coliformes fecales por estación.

Fuente: Elaboración propia