

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-03-07

Artículos

**Plugin CE una herramienta computacional para la
determinación de contaminantes emergentes por
sectores productivos: caso de estudio para la ciudad de
Bogotá-Colombia**

***Plugin CE* a computational tool for the determination of
emerging contaminants by industries process: Study
case study for the city of Bogotá-Colombia**

Carlos Peña-Guzmán¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0496-9612>

Erika Rodríguez², ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8172-4135>

Francisco Sanchez³, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2941-0678>

Manuel Rodríguez-Pinzón⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2010-6438>

Mayerling Sanabria⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7696-3247>

¹Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, cpena@unisalle.edu.co, carpeguz@gmail.com

²Programa de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, erikarodriguez@usantotomas.edu.co



³Programa de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, franciscosanchez@usantotomas.edu.co

⁴École Supérieure D'aménagement du Territoire et de Développement Régional, Université Laval, Québec, Canadá, manuel.rodriguez@esad.ulaval.ca

⁵Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Universidad de la Salle, Bogotá, Colombia, msanabria@unisalle.edu.co

Autor para correspondencia: Carlos Peña-Guzmán, cpena@unisalle.edu.co, carpeguz@gmail.com

Resumen

Los contaminantes emergentes son sustancias que en los últimos años han venido siendo identificados y cuantificados con mayor frecuencia en distintos tipos de agua; esto, asociado con el impacto ambiental, ecológico y de salud pública que generan. Se caracterizan por estar en bajas concentraciones, lo cual provoca que su detección sea costosa y especializada. Es por ello que en los países desarrollados existen programas de monitoreo y seguimiento, mientras que en países Latinoamericanos recién se empiezan a detectar sin una programación o frecuencia definida. El presente artículo presenta el diseño y la aplicación de una herramienta computacional denominada *plugin CE*, la cual es un *plugin* del *software* QGIS, escrito en código Python; dicha herramienta pretende ser un soporte técnico para la determinación de contaminantes

emergentes en sectores industriales mediante una identificación asociada con el tipo de sector empresarial y el procesos productivo que se llevan a cabo, al mismo tiempo tiene la capacidad de enlazarse con el catastro de redes sanitarias e identificar posibles puntos de muestreo. Como resultado del *plugin* se encuentra una guía paso a paso para su uso y un caso de estudio llevado a cabo en la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: contaminantes emergentes, ciclo urbano del agua, Latinoamérica, planeamiento territorial urbano.

Abstract

Emerging contaminants are substances that in recent years have been identified and quantified more frequently in different types of water, due to the environmental, ecological, and public health impact they generate. They are characterized by their low concentrations, which makes their detection costly and specialized. For this reason, in developed countries, there are monitoring and follow-up programs, while in Latin American countries they are just beginning to be detected without a defined schedule or frequency. This article presents the design and application of a computational tool called CE plugin, which is a QGIS software plugin, written in Python code, this tool aims to be technical support for the determination of emerging contaminants in industrial sectors, through an identification associated with the type of business sector and the production processes that are carried out, at the same time can link with the cadastre of sanitary networks and identify possible sampling points.

As a result of the plugin, there is a step-by-step guide for its use and a case study carried out in the city of Bogota

Keywords: Emerging contaminants, urban water cycle, Latin America, urban territorial planning.

Recibido: 17/02/2022

Aceptado: 14/11/2022

Publicado Online: 18/01/2023

Introducción

El asentamiento masivo de personas en centros urbanos del mundo ha generado un crecimiento acelerado de sus áreas y por lo tanto una mayor presión sobre los recursos naturales, en especial el recurso hídrico (El-Bastawesy, Adel, & Mohamed, 2018). Lo anterior se debe a los grandes volúmenes de agua residual que se producen en las ciudades, que en el caso de la mayoría de países en vía de desarrollo, como en el contexto Latinoamericano, se descargan con deficientes o nulos procesos de tratamiento a los cuerpos hídricos superficiales (Marchetti, Oliveira, & Figueira, 2019; van Lindert, 2016), introduciendo contaminantes que ocasionan deterioro en la calidad del agua y los ecosistemas, afectando a los seres vivos, incluyendo a los seres humanos y su salud (Boelee, Geerling, van der Zaan, Blauw, & Vethaak, 2019; Jia *et al.*, 2019).

Una variedad de estas sustancias se denomina como contaminantes emergentes (CE), los cuales son no convencionales y se caracterizan por presentarse en bajas concentraciones (de ng l^{-1} a $\mu\text{g l}^{-1}$), por lo que no se pueden detectar o medir fácilmente, y además no son removibles bajo las formas convencionales de tratamiento (Delgado, Capparelli, Navarro, & Marino, 2019; Novotna, Cermakova, Pivokonska, Cajthaml, & Pivokonsky, 2019; Peña-Álvarez & Castillo-Alanís, 2015). Dichas sustancias son cada vez más investigadas y por lo menos se cuenta con 1 036 compuestos, que algunos investigadores han agrupado para facilitar su manejo. Algunos de estos grupos corresponden a pesticidas, fármacos, productos de cuidado personal, filtros UV, disruptores endocrinos, hidrocarburos, drogas ilícitas, aditivos alimentarios y metabolitos (Peña-Guzmán *et al.*, 2019).

La aparición de los contaminantes emergentes en el recurso hídrico se da por el uso del agua y su paso por las urbes, incluyendo su aplicación en todas las actividades humanas (Pal, He, Jekel, Reinhard, & Gin, 2014; Rozos & Makropoulos, 2013; van Wezel *et al.*, 2018). Los estudios han mostrado que los CE están presentes en el ciclo urbano del agua, iniciando en la captación y en procesos como la potabilización, distribución, uso, conducción, esorrentía y efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales, principalmente donde solo se hacen tratamientos primarios (Amores, Meneses, Pasqualino, Antón, & Castells, 2013;). Estudios recientes han identificado que estos contaminantes se aportan a través de múltiples fuentes, dentro de las cuales se contemplan aguas residuales domésticas, industriales e institucionales (Dharupaneedi *et al.*, 2019), y que existe una asociación entre los tipos de contaminantes y el uso del

agua de acuerdo con la actividad económica (Rodil *et al.*, 2019; Verlicchi, Galletti, Petrovic, & Barceló, 2010; Vystavna *et al.*, 2018), y el uso del suelo (Adeola-Fashae, Abiola-Ayorinde, Oludapo-Olusola, & Oluseyi-Obateru, 2019).

Diferentes países europeos y de Norteamérica llevan más de 20 años estudiando este tipo de sustancias o compuestos, que han estado presentes en los diferentes procesos del ciclo urbano del agua, lo que ha permitido analizarlos, identificarlos, cuantificarlos y, en algunos casos, generar normas y políticas de control y seguimiento. Por otra parte, en la gran mayoría de países de América Latina los estudios de dichos contaminantes no superan los 10 años, no presentan continuidad y en ocasiones solo son llevados a cabo como investigaciones académicas y no como una herramienta de construcción de políticas públicas (Aminot *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2019).

Uno de los problemas por los cuales en América Latina no se han realizado estudios avanzados sobre los CE es que la detección de estas sustancias del orden de partes por millón o incluso por billón y hasta menores es muy costosa, dado que requiere de instrumentos de laboratorio y profesionales especializados que realicen los procedimientos (Dharupaneedi *et al.*, 2019; Dimpe & Nomngongo, 2016; Peña-Álvarez & Castillo-Alanís, 2015). A fin de no realizar mediciones equívocas, es útil llevar a cabo una búsqueda previa de lugares con potencial presencia de estos CE antes de hacer tales mediciones. Así, se requiere la búsqueda de herramientas que faciliten el estudio de las fuentes principales de los CE en cuestión, para que se den los primeros indicios de dónde encontrarlos, lo que es el primer paso de vital importancia para su futura identificación

y cuantificación (Polyakova, Artaev, & Lebedev, 2018; Sun, Chen, Lin, & An, 2018).

De acuerdo con lo anterior, es necesario implementar una herramienta que sirva para cubrir grandes áreas geográficas, con la capacidad de integrar información en múltiples formatos, pues ésta proviene de distintas instituciones o fuentes (Singh, 2019). Una de las plataformas más usadas son los sistemas de información geográfica (SIG), que se han empleado para el control y monitoreo del recurso hídrico por su capacidad para importar y procesar información extensa (Langat, Kumar, & Koech, 2019), y de dar soluciones a diferentes problemáticas ambientales (Singh, 2019).

Respondiendo a tal necesidad, este artículo presenta el desarrollo y la aplicación de la herramienta computacional *plugin CE*, la cual, mediante la generación de mapas, indica la posible presencia de un grupo de contaminantes emergentes en un lugar específico y permite identificar lugares en los que se podrían encontrar potencialmente.

El estudio de caso es la ciudad de Bogotá (Colombia), pues allí no se ha implementado ningún tipo de programa de monitoreo o seguimiento de CE, a pesar de ser la sexta capital más poblada de Latinoamérica y una de las urbes con uno de los ríos más contaminados del continente, además de presentar un continuo crecimiento industrial en varias zonas de su territorio (Aldana & López, 2017; Rojas-Bernal, 2013; Torres, Méndez-Fajardo, López-Kleine, Galarza-Molina, & Oviedo, 2013).

El desarrollo de este artículo se plantea de la siguiente forma: en primer lugar, en la metodología se describe el fundamento teórico,

interface y el desarrollo e interacción del usuario con el *plugin*; en segundo lugar se presenta el caso de estudio realizado en la ciudad de Bogotá como ejemplo práctico de la herramienta; en tercer lugar se mencionan los beneficios y recomendaciones de uso del aplicativo.

Metodología

Plugin CE

Para el desarrollo del *plugin CE* se planteó el uso de los sistemas de información geográfica (SIG), principalmente por su capacidad de almacenar gran cantidad de información y su versatilidad en la presentación visual de los datos (Albrecht, 2018; Stevović & Nestorović, 2016). Dentro de la revisión de artículos científicos que evalúan los SIG de código abierto en términos de gestión del recurso hídrico se encontró que QGIS (s.f.) es el *software* gratuito y de código abierto con licencia pública general (GNU) que cuenta con más ventajas operativas computacionales, beneficiando el desarrollo del *plugin CE* al permitir sobre todo la importación y exportación de datos en diferentes formatos, la gestión de datos geoespaciales, la construcción de mapas y la generación de extensiones de las capacidades de QGIS a través del mecanismo de *plugins* (Chen, Shams, Carmona-Moreno, & Leone, 2010; Meyer & Riechert, 2019; Nielsen, Bolding, Hu, & Trolle, 2017; Rossetto *et al.*, 2018; Steiniger & Hay, 2009). Esta herramienta SIG se puede descargar

desde su página web (www.qgis.org), donde para el correcto funcionamiento del *plugin* CE se requiere al menos la versión 3.0.

Los *plugins* se pueden elaborar en los lenguajes de programación C++ y Python. Para la elaboración del *plugin* CE se eligió Python, ya que es un lenguaje de sintaxis más sencilla que C++ por ser de tipo interpretado y orientado a objetos (Borcherds, 2007), además tiene gran cantidad de librerías y módulos que se articulan con los diferentes *softwares*, característica aprovechable para el *plugin* pues permite el manejo y la extensión de las herramientas de QGIS por medio de la librería PyQGIS (Sherman, 2014), así como la adaptación de interfaces gráficas de usuario (GUI), siendo QT *designer* (QT, s.f.) (www.qt.io) la GUI usada para este *plugin* donde se diseñaron la ventana principal y los botones que gráficamente se presentan al usuario cuando se ejecuta (Abbott, 2018).

Las herramientas tecnológicas nombradas se acoplan para dar soporte al desarrollo del *plugin*, creando una arquitectura de la GUI generada dividida en tres partes (Figura 1): datos de entrada, proceso interno y datos de salida. Los datos de entrada serán suministrados por el desarrollador y se componen de archivos *shapefiles*, una base de datos de los predios de las empresas o industrias que generan descargas de agua residual en la ciudad de Bogotá y los PDF de las diferentes guías; el proceso interno se refiere a la interacción generada entre QGIS, Python y QT, que da origen a los pseudocódigos de los *scripts* que se ejecutan en la ventana del *plugin* que enrutan los archivos de entrada y de salida; por último, como archivos de salida se obtiene un mapa donde su función principal es dar una visualización de la presencia y ausencia posible (o

potencial) del grupo de CE determinado, y una base de datos que también se suministró como dato de entrada por el desarrollador, pero esta vez se obtendrá como descarga para el usuario; cada una de las partes será explicada con más detalle en los numerales siguientes.

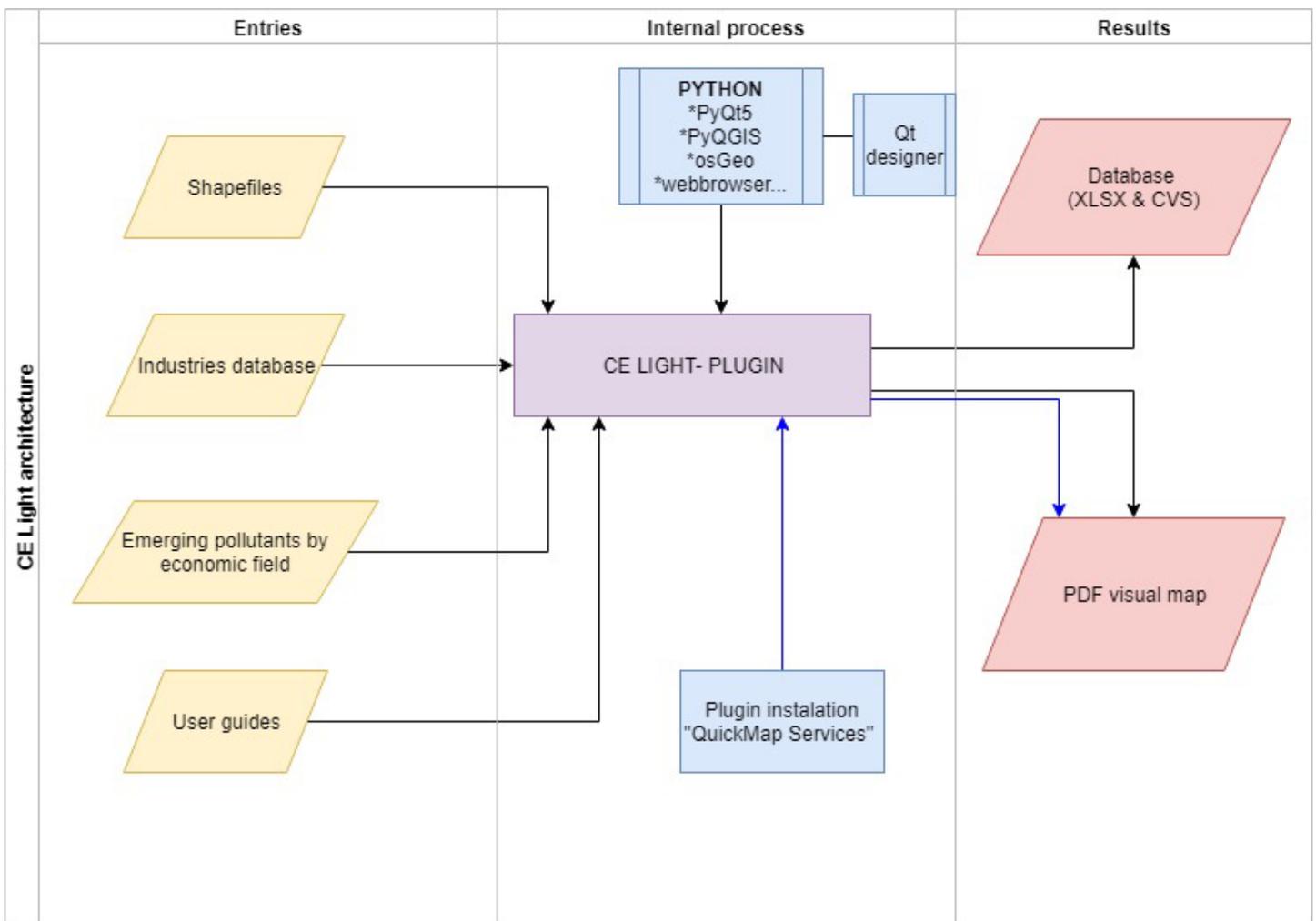


Figura 1. Descripción lógica de flujo de datos del *plugin*.

Como cualidades, se destaca que el *plugin* cuenta con una instalación guiada, que una vez añadida no requiere que el usuario cargue ningún tipo de información o mapa adicional, pues ya se encuentra en la herramienta, es decir, que el usuario solo debe navegar por las pestañas siguiendo los mensajes de ayuda hasta que se generen las salidas esperadas del programa.

Datos de entrada

Archivos *shapefile*

Los archivos *shapefile* (.shp) se refieren a las capas (*layers*) necesarias que se cargan a la aplicación como alimentación del *plugin*. Este formato permite obtener entidades geográficas con atributos referentes a la tipología presentada. Los *shapefile* más representativos para la evaluación de los CE son la red de alcantarillado; polígonos de predios de toda la ciudad; polígonos de predios específicos de las empresas existentes; y la delimitación de la zona de estudio, en este caso de la ciudad de Bogotá. Los *inputs* de cada archivo son diferentes, pues contienen información técnica específica de cada capa descritos en la Tabla 1; cabe anotar que se requiere que estén debidamente georreferenciados para que todos los datos coincidan espacialmente.

Tabla 1. Datos de entrada de los *shapefiles* necesario en la aplicación.

<i>Shapefiles</i>	<i>Inputs</i>
Red de alcantarillado	Identificación de la línea representada, diámetro, cotas rasantes, bateas, claves iniciales y finales para cada una, datos del proyecto con el cual se construyó el tramo
Polígonos de predios de la ciudad	Identificación del objeto, área, código unificado de nomenclatura urbana (CUNU), consolidador de hacienda e información pública (CHIP), dirección, matrícula inmobiliaria y estrato
Polígonos de los predios correspondientes a empresas e industrias que generan descargas residuales reportadas a la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)	Razón social, sector, tema, subtema, CHIP, CIIU, CE que produce, origen de la descarga y tipo de receptor, entre otros. Descritos ampliamente en la Tabla 3
Polígono de delimitación de Bogotá	Nombre, código del departamento según la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN), área, longitud y ancho

Identificación de contaminantes emergentes asociados con diferentes actividades económicas o industriales

Para el desarrollo de la herramienta se utilizó una clasificación existente de los contaminantes emergentes que corresponde a nueve conjuntos de sustancias que se detallan en una revisión bibliográfica desarrollada por Peña-Guzmán *et al.* (2019) para el caso Latinoamérica, donde se

agruparon de acuerdo con sus composiciones, características o usos según estudios anteriores, como se muestra de forma resumida en la Tabla 2. Después se asignó una o más clasificaciones de CE a cada una de las actividades presentes en el documento oficial de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (entidad encargada de la administración, control y seguimiento del medio ambiente en la ciudad) denominado “Matriz del recurso agua a monitorear por actividad productiva”, el cual brinda información detallada sobre las descargas al sistema de alcantarillado público que no aplica para usos domésticos, razón por la cual el *plugin* no contempla este tipo de fuentes.

Tabla 2. Clasificación de CE y su descripción.

Clasificación	Descripción
Fármacos	Sustancias químicas como medicamentos de uso común o especializado; incluye tratamientos para el cáncer, medicamentos psiquiátricos u otros; los fármacos se asocian con hospitales, centros psiquiátricos, veterinarias y relacionados (Grzesiuk, Spijkerman, Lachmann, & Wacker, 2018)
Productos de cuidado personal	Productos de aseo, perfumes, desodorantes, de belleza o sanidad ligados con actividades humanas cotidianas. Observables en hogares, hoteles, centros comerciales, almacenes de cadena y similares (Biel-Maeso, Corada-Fernández, & Lara-Martín, 2019)
Filtros ultravioleta	Utilizados para cubrir y proteger del deterioro de la radiación ultravioleta que se genera por la exposición a la luz solar y para la conservación de materiales. Se adiciona principalmente a pinturas o a productos de belleza, por lo que se pueden encontrar en talleres automotrices, salones de belleza y fábricas de pintura (He, Hain, Timm, Tarnowski, & Blaney, 2019)

Clasificación	Descripción
Disruptores endocrinos	Sustancias químicas que tienen en común la generación de afecciones al sistema endocrino. Están presentes en los sistemas de refrigeración, botellas plásticas, piezas metálicas o plásticas, instrumentos médicos, cosméticos, detergentes y pesticidas, por lo que su uso es amplio y se encuentran en cualquier institución que utilice los elementos descritos (Mantovani, 2019)
Hidrocarburos	Compuestos que principalmente provienen del petróleo. Sirven para múltiples actividades humanas y mediante su refinación pueden llegarse a utilizar para la fabricación de materiales e insumos, como detergentes, jabones y perfumes; se pueden encontrar fácilmente en estaciones de venta de combustibles (Alvarado, Delgado-Linares, & Medina, 2015)
Drogas ilícitas	Estas sustancias pueden variar de país a país, ya que incluso se pueden referir a drogas elaboradas legalmente, pero sin prescripción médica. Su uso puede estar asociado casi con cualquier medio y provenir desde colegios hasta sitios recreativos (Causanilles <i>et al.</i> , 2017)
Aditivos alimentarios	Sustancias que permiten la conservación de los alimentos y sus propiedades organolépticas. En su mayoría, la elaboración de estos productos también incluye endulzantes artificiales y colorantes; se encuentran en fábricas de alimentos (Ferreira & Caroch, 2017)
Metabolitos	Sustancias resultantes o utilizadas durante el metabolismo en los organismos vivos. Incluyen los productos generados después del consumo de medicamentos, en general se encuentran en espacios masivos, como estadios y también en hospitales (Dvořáková-Březinová, Vymazal, Koželuh, & Kule, 2018)
Pesticidas	Productos químicos que se utilizan para el manejo de especies u organismos no deseados, se pueden emplear para agricultura o manejo de plagas, por lo que se encuentran en fábricas que los elaboran o lugares donde se usan (Köck-Schulmeyer <i>et al.</i> , 2013)

El proceso que se llevó a cabo para asignar una o más de las categorías de contaminantes emergentes seleccionadas a cada descarga para los 10 155 registros de empresas se hizo de forma manual. Esto implicó una revisión previa del documento oficial de la SDA, para que a partir de evidencia debidamente soportada se pudieran asociar grupos de CE con las aguas residuales de las empresas. En este caso, la revisión se hace exclusivamente para usos industriales, por ser los principales generadores de CE al ciclo urbano del agua.

Base de datos

Una de las entradas más importantes es la base de datos de las empresas de Bogotá debido a que esta información es la que se consolida para obtener la tabla de atributos del archivo *shapefile* predios de empresas; en esta base se consigna información de ubicación e identificación de los predios, clasificación de las empresas, posibles grupos de contaminantes emergentes producidos por la actividad económica e información técnica de la descarga de agua residual que reporta la industria; dicha información se diligencia en más de 30 campos, los cuales se explican a mayor detalle en la Tabla 3.

Tabla 3. Base de datos de empresas para el formato CSV.

Campo	Descripción
Año	Año en el cual se colecta la información
Razón social	Es el nombre con el cual se constituye legalmente la empresa ante la Cámara de Comercio de Bogotá
Nombre comercial	Es el nombre con el cual la empresa se identifica ante sus usuarios o consumidores
Sede principal o nombre de la sede	Las empresas pueden tener varias sedes; si es única, será la principal; si posee más de una serán sedes secundarias
CIU	Es el código correspondiente al sistema de Clasificación Industrial Internacional Uniforme específico para cada actividad económica dado por la Cámara de Comercio de Bogotá
Sector	Dentro de los sectores se encuentran los siguientes: hidrocarburos, agroalimentario, química, servicios, otros sectores
Tema principal y subtema	Clasificación de actividades económicas adoptado de la matriz del recurso agua a monitorear por actividad de la Secretaría Distrital de Ambiente (entidad ambiental de Bogotá). De los 24 temas principales se derivan los subtemas, que son actividades específicas
Contaminantes que produce	Se debe revisar el archivo del <i>plugin</i> denominado "contaminante_con_sectores.xlsx" que se encuentra en la capeta del <i>plugin</i> , y dependiendo de la actividad identificar el contaminante y poner el nombre debajo de la columna que corresponde
Núm. UPZ y nombre UPZ	Las UPZ son Unidades de Planeamiento Zonal definidas por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Bogotá. En éste, cada UPZ tiene un número asignado; su tamaño es más grande que un barrio y más pequeño que una localidad

Campo	Descripción
Localidad y código localidad	Las localidades están conformadas por dos o más UPZ y también tienen un código de localidad según la Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá
Cuenca principal, subcuenca y código cuenca	Se refiere a las cuencas hidrosanitarias para el caso de Bogotá: Salitre-Torca (S), Fucha (F) y Tunjuelo (T), siendo el código la letra encontrada entre paréntesis
ID predio	Es la concatenación entre el código de la cuenca y el código de la localidad
CHIP	Consolidador de Hacienda e Información Financiera Pública es un código alfanumérico, pero tiene la característica de ser un sistema de información económica, social y ambiental que usa plataformas tecnológicas para su operación; por lo tanto, es uno de los campos más importantes para este <i>plugin</i>
Origen de la caracterización	Se refiere a quién realizó la caracterización del vertimiento: si el usuario o una entidad gubernamental
Puntos de descarga	El número de puntos de descarga que tiene la empresa o industria
Origen de la descarga	Se refiere al proceso industrial, administrativo o de funcionamiento, por ejemplo, un casino
Tipo receptor y nombre del receptor	Se refiere a quién recibe el vertimiento. Puede ser el Sistema de Alcantarillado Sanitario, cuerpo de agua superficial o campo de infiltración, entre otros
Coord. X y coord. Y	Son las coordenadas que ubican la empresa geográficamente
Datos de caudales a registrar para la descarga de agua residual de cada empresa	Se debe diligenciar caudal promedio (l/s); caudal aforado (l/s); caudal promedio horario reportado (l/s); caudal máximo vertido (l/s); tiempo de descarga (h/día); número de días que realiza la descarga en la semana (días/semana); caudal aguas residuales industriales (ARI) (m ³ /mes)
Tipo de descarga	Si el flujo de la descarga es intermitente, por baches o continuo

Desarrollo interno de CE *lighth*

La programación se realizó mediante cuatro *scripts* de Python que siguen la secuencia lógica mostrada en la Figura 2. En cada uno se diseñaron clases (*Class*) que compilan la información de entrada dándole funcionalidad a la ventana del *plugin*. Además de usar las librerías PyQGIS y PyQt5 se importaron otros módulos que permiten el manejo de los datos, como osGeo, que manipula la GDAL (*Geoespacial Data Abstraction Library*), específicamente los datos vectoriales geoespaciales (OGR) para administrar los *layers* de redes, polígonos de predios y puntos que representan la localización de plantas o pozos, Webbrowser, csv, entre otros. También se programa la emisión de los mensajes que recibe el usuario según la acción que realice, teniendo en cuenta que cada botón carga o descarga un archivo diferente.

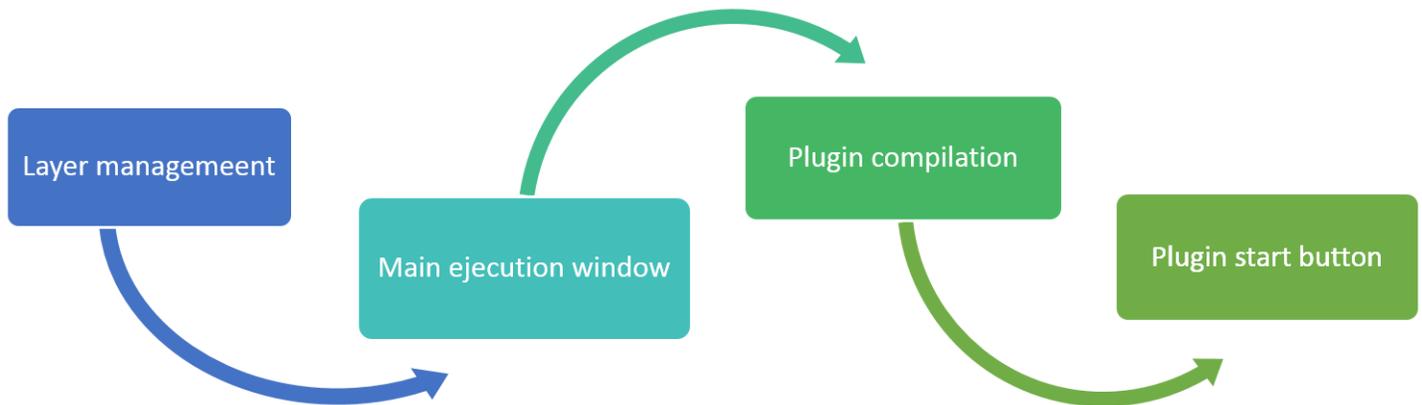


Figura 2. Preprocesamiento de datos e información organizada en *scripts* para la ejecución del *plugin*, donde se enrutan los archivos de entrada y salida; se configura GUI, y se programan los mensajes al usuario.

Resultados de la ejecución del *plugin*

Como resultado se obtienen dos documentos de salida:

- Del *plugin CE* se puede descargar un mapa en formato PDF donde se visualizarán los archivos *shapefiles* que se tengan activas en el lienzo de QGIS, con un formato predeterminado que consta de título, convenciones, una breve descripción de lo que se encuentra en el mapa, ubicación geográfica general, escala, descripción del sistema de coordenadas, referencia de las imágenes satelitales usadas, grilla y descripción del sistema de coordenadas, el cual tiene como principal fin la identificación de posibles zonas que presentan uno o más CE específicos.

- El usuario del *plugin* podrá descargar la base de datos que se alimentó anteriormente (se encuentra disponible en los formatos XLSX y CSV); este archivo tiene la particularidad de ser un dato tanto de entrada como de salida, pues puede ser modificado para luego ser incorporado nuevamente al *plugin* por medio de la última pestaña que ofrece el *plugin*.

Resultados

El objetivo en este inicio de capítulo es exponer y describir la funcionalidad y puesta en marcha del *plugin CE* en su primera versión.

Como cualquier *plugin* de la plataforma QGIS que se puede cargar solo cuando sea necesario, este *plugin*, al ser instalado, aparecerá como un ícono con el nombre "CE_light" ubicado en la barra de herramientas de QGIS.

Al iniciar el *plugin* se desplegará una ventana emergente con tres pestañas que le dan la funcionalidad (Figura 3). Indiferentemente de la pestaña que se esté ejecutando se crearon dos campos para mensajes: en "mensaje nuevo" se consignan los comentarios de verificación o advertencia de la acción que se acaba de realizar; en el campo de "mensaje" se guarda el historial de los mensajes que el *plugin* ha dado al usuario durante su ejecución, empezando con la fecha y hora en la cual se inicializó el mismo.

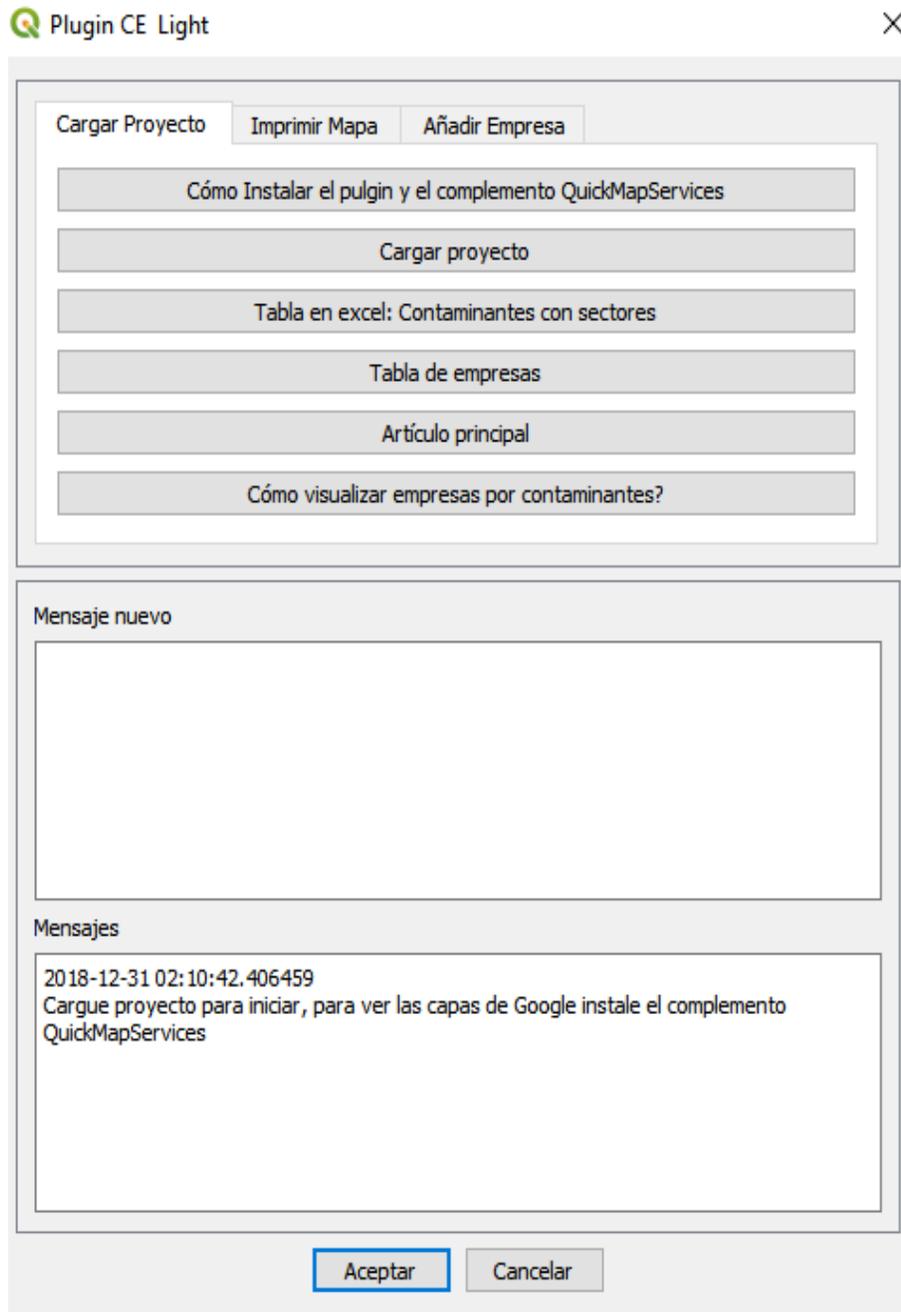


Figura 3. Ventana principal del *plugin* con seis botones en la primera pestaña, donde se encuentra “cargar Proyecto”, y botones que contienen documentos guía o soporte del *plugin*.

Cargar proyecto

El *plugin* dispone la primera pestaña para ubicar inicialmente los documentos guía sobre cómo usar de forma adecuada la herramienta; en segundo lugar se encuentra cargar proyecto, el cual, al accionarlo, sube automáticamente a la plataforma QGIS los *layers shapefile* más representativos descritos anteriormente y mostrados mediante la Figura 4. Para diferenciarlos, las convenciones de colores representan que el amarillo corresponde a la limitación política de Bogotá; el verde, a los polígonos de las empresas de Bogotá; el azul, a la red de alcantarillado sanitario local; y el naranja identifica al alcantarillado sanitario troncal. Además, se muestran otros *layers* que podrían ser de interés para el usuario, como cajas domiciliarias, sumideros, pozos o cámaras de inspección, entre otros. Para la debida interpretación de la información de los *layers* se debe tener en cuenta que las abreviaturas usadas para nombrar los *shapefiles* se connotan de la siguiente forma: Als corresponde a alcantarillado sanitario y Alp corresponde a alcantarillado pluvial.

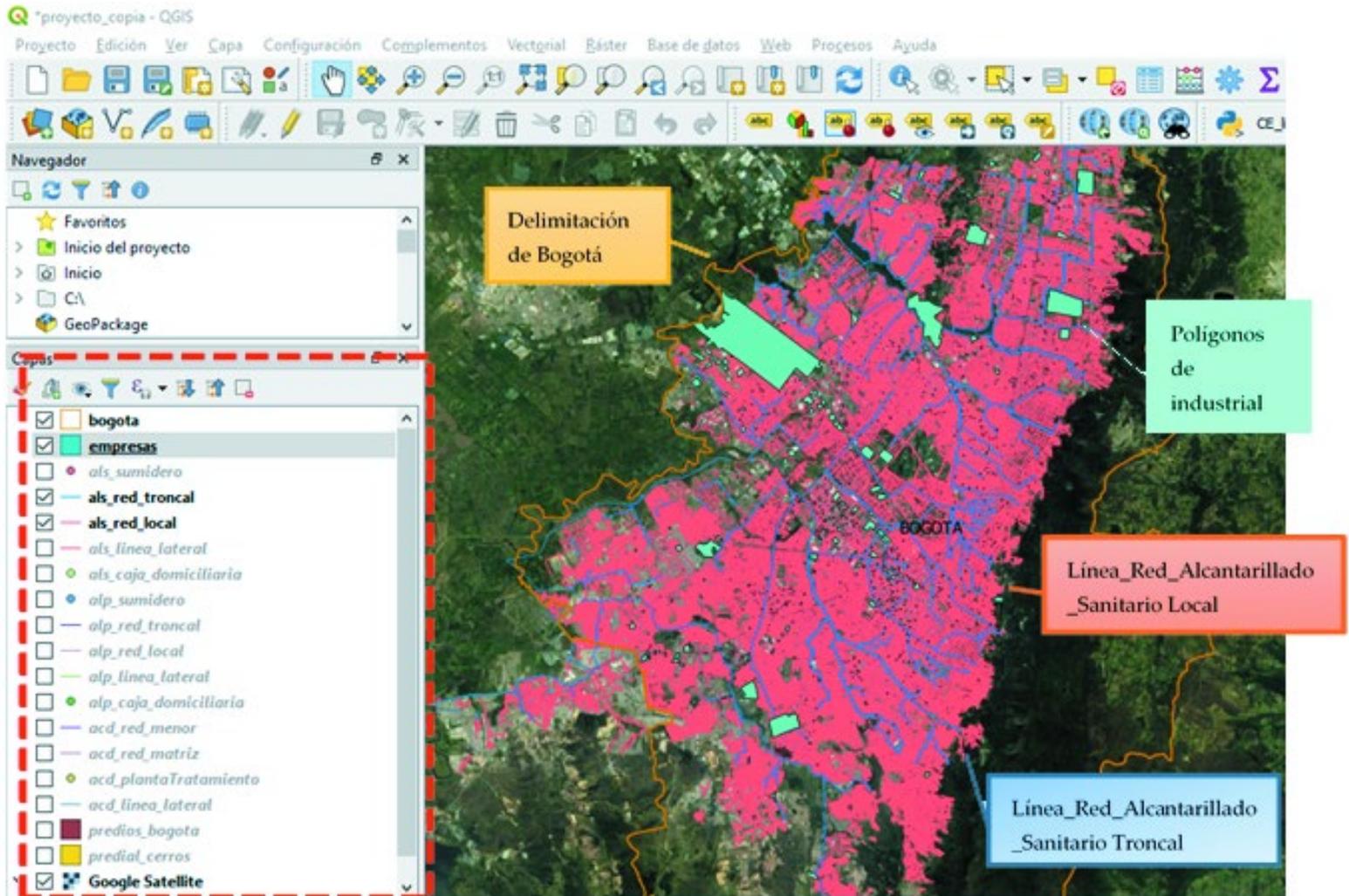


Figura 4. Ventana de QGIS al cargar el proyecto. En el recuadro rojo de línea punteada, ubicado a la izquierda, se encuentran los *layers* que se pueden activar. En esta figura se activaron cuatro de los más representativos, descritos en los cuadros de texto.

Con el fin de proteger la configuración del *plugin*, se creará por defecto una copia del proyecto cargado, donde los *layers* pueden ser

administradas y modificadas por el usuario; sin embargo, los cambios realizados no se podrán guardar en el proyecto base de la aplicación; esto evita que se altere el *plugin* en cada ejecución.

En el ítem “Tabla en Excel: contaminantes con sectores” se descarga un documento en formato *xlsx*, el cual contiene una lista con los nueve grupos generales de contaminantes emergentes, que se asocian con un sector, tema principal y subtema según la revisión bibliográfica; este archivo de Excel se puede guardar y modificar, pues no genera modificaciones al programa. Es importante que el usuario revise este archivo para la debida interpretación del uso del suelo asociado con la producción de un CE específico. En los demás botones también se descargan archivos, pero en formato PDF que sirven como información base o guías ilustrativas para la ejecución de las siguientes pestañas o botones.

En la guía “¿Cómo visualizar empresas por contaminantes?” se explica el proceso de categorización para visualizar la presencia o ausencia del contaminante que se desee analizar, en resumen, se lleva a cabo directamente en las propiedades de la *layers* > simbología > categorizado, eligiendo el contaminante a visualizar y al último presionando clasificar.

Caso de estudio

Bogotá es la capital de Colombia y cuenta con aproximadamente ocho millones de habitantes. Es el centro poblado urbano e industrial más grande del país, pues llega a alcanzar una densidad poblacional superior a 192 habitantes por hectárea. Se divide en 20 localidades: 19 urbanas y 1 rural, que es la de mayor extensión (Torres *et al.*, 2013).

Bogotá tiene una extensión de 33 km de norte a sur y de 16 km de oriente a occidente. Su altitud va de 2 500 a 2 800 metros sobre el nivel del mar (msnm). La zona se caracteriza por un temperatura promedio de 14 °C y una precipitación media anual de 892.1 milímetros (Aldana & López, 2017).

La ciudad se divide en cuatro cuencas hidrográficas, que corresponden a sus cuatro ríos principales, como se muestran en la Figura 5, lo cuales están distribuidos de norte a sur de la siguiente forma: inicia con el río Torca, el río Salitre, río Fucha y finalmente por el río Tunjuelo (Peña-Guzmán, Melgarejo, López-Ortiz, & Mesa, 2017). Todos sus cauces han sido intervenidos y hay algunos que han sido canalizados en concreto en algunos tramos. Todos estos ríos, a su vez, son afluentes del río Bogotá.

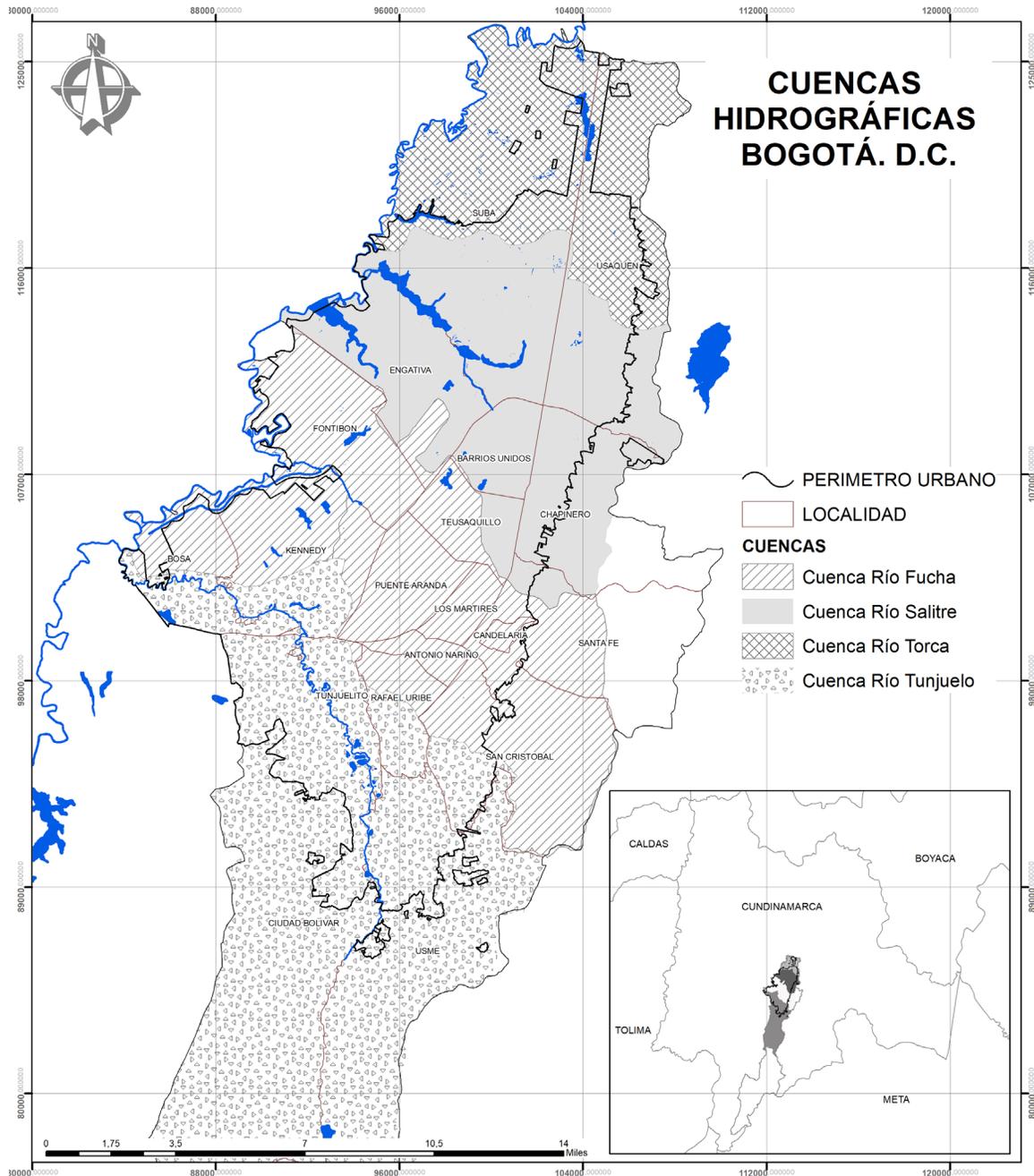


Figura 5. Mapa de Bogotá donde se encuentra la localización general en el departamento de Cundinamarca, los cuerpos de agua, sus principales ríos y cuencas hidrográficas.

Bogotá tiene múltiples subdivisiones, como se observa en la Figura 6, donde de mayor a menor tamaño corresponden a localidades (20), unidades de planeamiento zonal UPZ (70) y barrios (5 502). Adicionalmente, el *plugin* CE incluye el código homologado de identificación predial (CHIP), tema con subtema de la industria, el contaminante emergente que se produce, el sitio donde se descarga y la cuenca donde sucede.

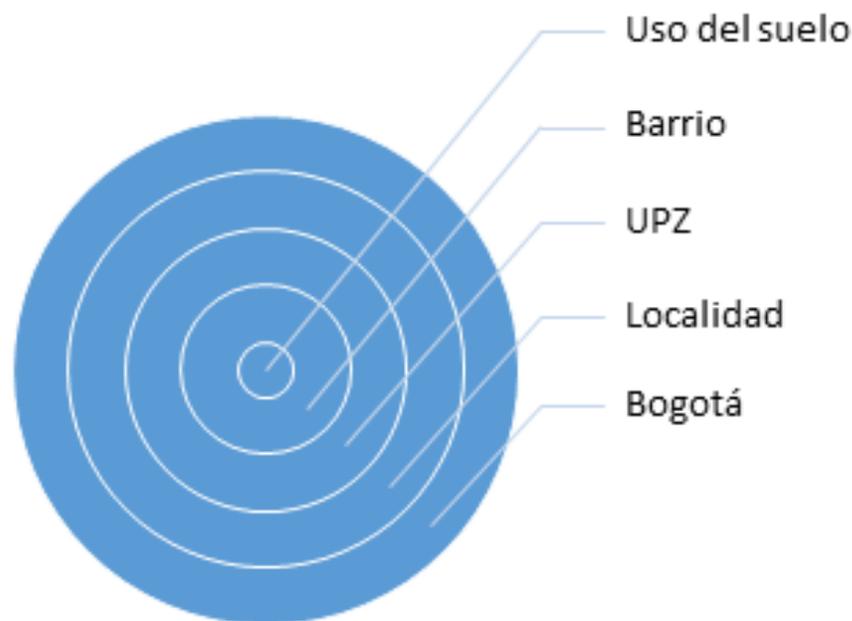


Figura 6. Divisiones administrativas presentadas en el Distrito Capital de Bogotá, donde el tamaño de los círculos es proporcional a la extensión de cada una de las divisiones. Siendo Bogotá el ítem más grande compuesto de localidades, que se componen de UPZ, que agrupan barrios conformados por barrios.

La ciudad en el sector de servicios públicos cuenta actualmente con una cobertura de acueducto del 100 % y de alcantarillado de aproximadamente el 90 %. Respecto al agua residual, en el ciclo urbano en Bogotá existe un sistema de alcantarillado convencional, donde puede ser combinado o separado, es decir, que transportan por un conducto agua lluvia y por el otro el agua residual, o los dos al tiempo (Peña-Guzmán, Melgarejo, & Prats, 2016).

Bogotá presenta deficiencias en el tratamiento del agua residual, ya que los vertimientos se hacen directamente a los cuerpos hídricos superficiales, que desembocan sin tratamiento alguno al río Bogotá, con excepción de la planta de tratamiento de aguas residuales Salitre, la cual sirve apenas para un sector de la ciudad y cuenta con un tratamiento primario que procesa solo el 25 % de las aguas residuales que recibe (Rojas-Bernal, 2013).

A continuación se desarrolla un ejemplo con el CE hidrocarburos que genera dos colores para el *shapefile* de predios de empresas, los cuales se pueden modificar a gusto del usuario. En este caso, con amarillo se encuentran las empresas que por su actividad económica producen este contaminante y en morado las que no, dando como resultado lo observado en la Figura 8, encontrando como particularidad que hay un gran polígono amarillo ubicado en la parte noroeste del lienzo de QGIS, el cual puede ser objeto de análisis, al ser un polígono representativo en el mapa y en su descarga de agua posiblemente presentar del CE hidrocarburos (Figura 7).

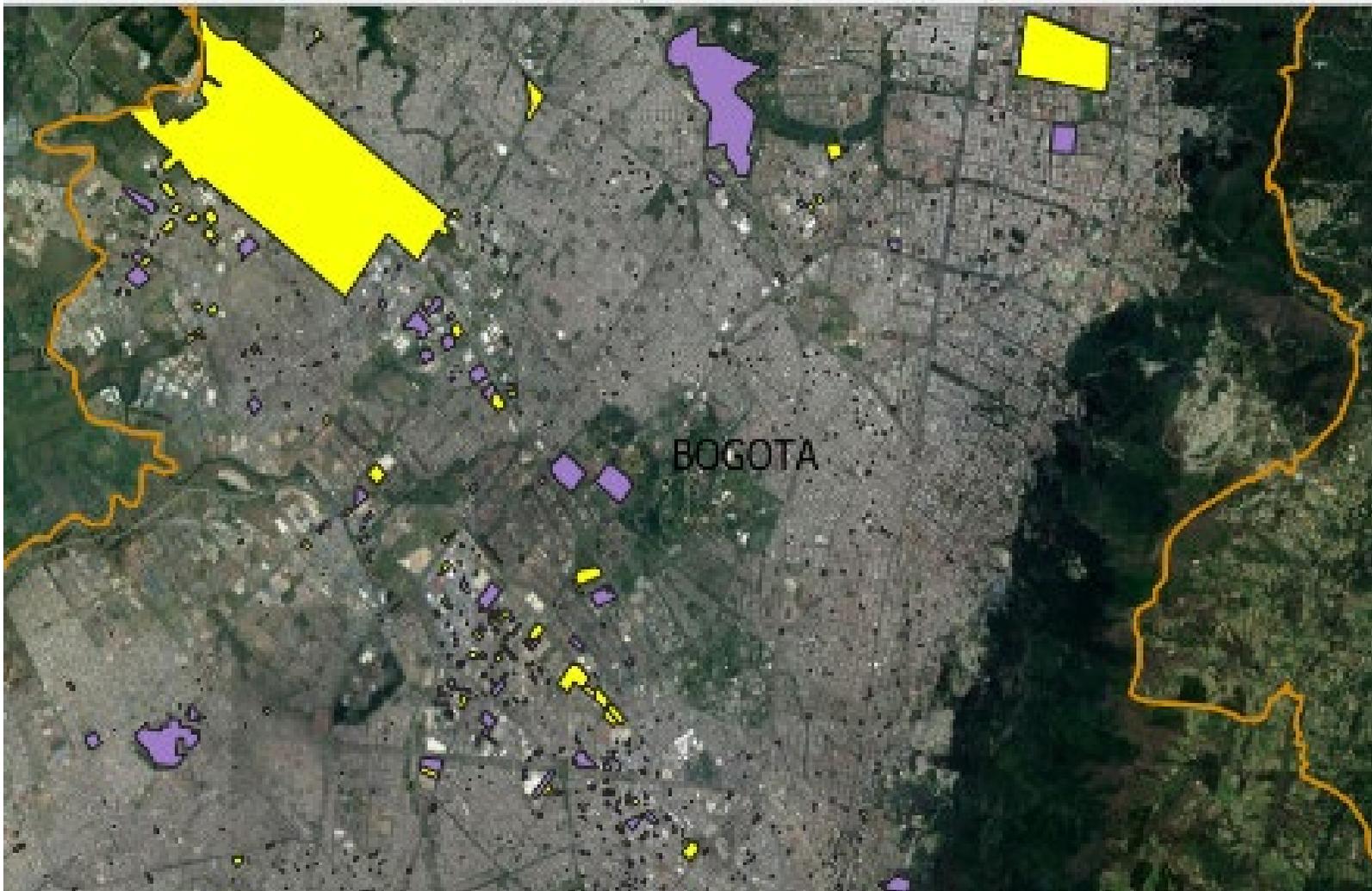


Figura 7. Lienzo de QGIS en la visualización de actividades asociadas con el CE hidrocarburos en color amarillo; en color morado las que no se relacionan.

Según la tabla de atributos del *layer* predios de empresas y usando la herramienta de identificación de QGIS, se obtuvo que el polígono

corresponde al Aeropuerto Internacional El Dorado, ubicado en la cuenca hidrosanitaria Fucha; localidad Fontibón; UPZ Aeropuerto El Dorado; barrio El Bogotano, con CHIP AAA0065UHEA. Se registra que el origen de la descarga es por el lavado de patios; es de tipo intermitente; el cuerpo receptor es la red de acueducto y alcantarillado; no hay registro de caudal o información técnica de la descarga.

Cabe resaltar que el proceso de categorización también se puede realizar para otros campos diferentes a los de CE. Los datos estandarizados permitieron que se visualicen más aspectos de la información de los *layers*. El usuario es quien tendrá a disposición la información para realizar el tratamiento pertinente y así poder usarlo como base argumentada para decisiones territoriales o de otros campos de acción.

Además, se puede clasificar la información de los otros *layers* presentados, no solo la de empresas, que por sus atributos estandarizados en categorías se lograría realizar un análisis por medio de la presentación en un mapa de las redes y clasificadas por los diámetros de las tuberías y los predios por estrato, entre otros aspectos.

Mapa resultado del *plugin*

En la segunda pestaña, denominada "imprimir mapa", se genera el archivo de salida, en el cual se compilan y visualizan los datos que se mostraron en la anterior pestaña (Figura 8). El mapa se puede generar

en cinco escalas: 1:200 000 (Figura 8a); 1:100 000 (Figura 8b); 1:50 000 (Figura 8c); 1:25 000 (Figura 8d); 1:5 000 (Figura 8e), siendo 1:200 000 la de menor detalle, pero que cubre toda la zona urbana de Bogotá, donde por su tamaño se pueden realizar análisis de información a nivel de cuenca hidrográfica o hidrosanitaria; en el caso contrario, la escala de más detalle es la 1:25 000, donde se pueden visualizar las manzanas de los barrios. El usuario elige la escala, dependiendo del fin que le quiera dar a la información suministrada por el mapa. En la generación del mapa debe tener en cuenta que al accionar el botón “generar mapa”, el *plugin* toma la vista del centro del lienzo de la ventana de QGIS en la escala elegida, cubriendo el rectángulo destinado para graficar. Por lo tanto, el usuario debe ubicar manualmente la zona que desea visualizar.

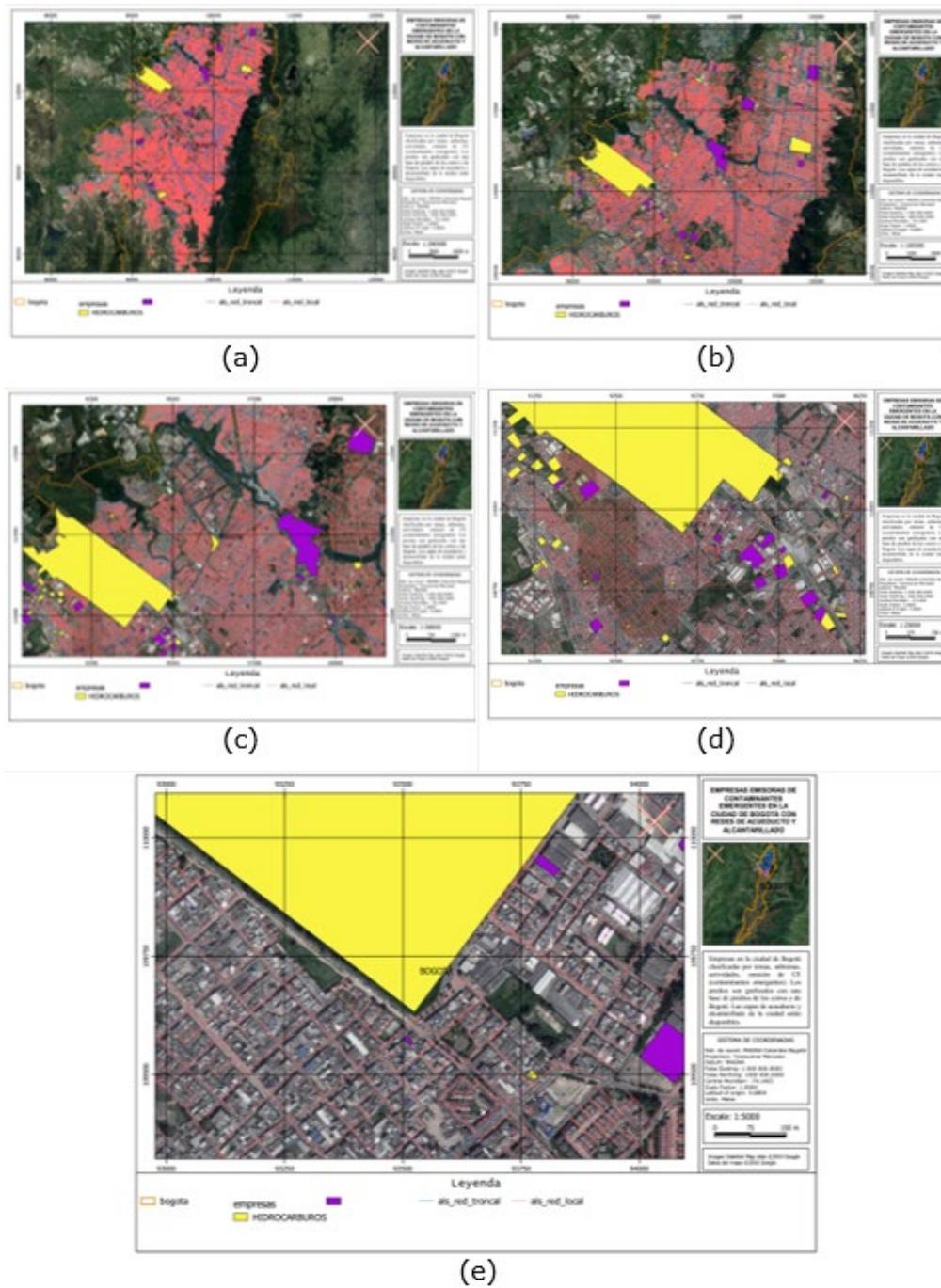


Figura 8. Mapas en formato PDF: (a) mapa a escala 1:200 000; (b) 1:100 000; (c) 1:50 000; (d) 1:25 000, y (e) 1:5 000.

Para la demostración de la generación de los mapas con diferentes escalas se va tomar de nuevo como punto de referencia el polígono del Aeropuerto Internacional El Dorado, siguiendo el ejemplo con el CE hidrocarburos; como aclaración, la información de cada mapa no varía solo cambia la ilustración del alcance de cada escala; estos mapas contienen por defecto un título, una grilla de coordenadas, la ubicación general, una breve descripción de lo que se presenta en el mapa, la leyenda, escala e información del sistema de coordenadas; esto se detalla en la Figura 8e.

La finalidad de tener escalas con tanto detalle es dar una herramienta al usuario para identificar la descarga que realiza una empresa específica a la red de alcantarillado; al activar el *layer* de pozos o cámara de inspección de esta red se tendrá la posición en la cual se puede llegar a realizar un muestro o monitoreo de dichas descargas al sistema.

Añadir o modificar empresas

Esta pestaña (Figura 9) tiene como objetivo añadir nueva información de las nuevas empresas desde la base de datos para luego ser consolidada y modificada en el archivo *shapefile* de las empresas o industrias. En esta base de datos es posible ingresar grandes cantidades de información, a fin de obtener actualización continua de la misma.

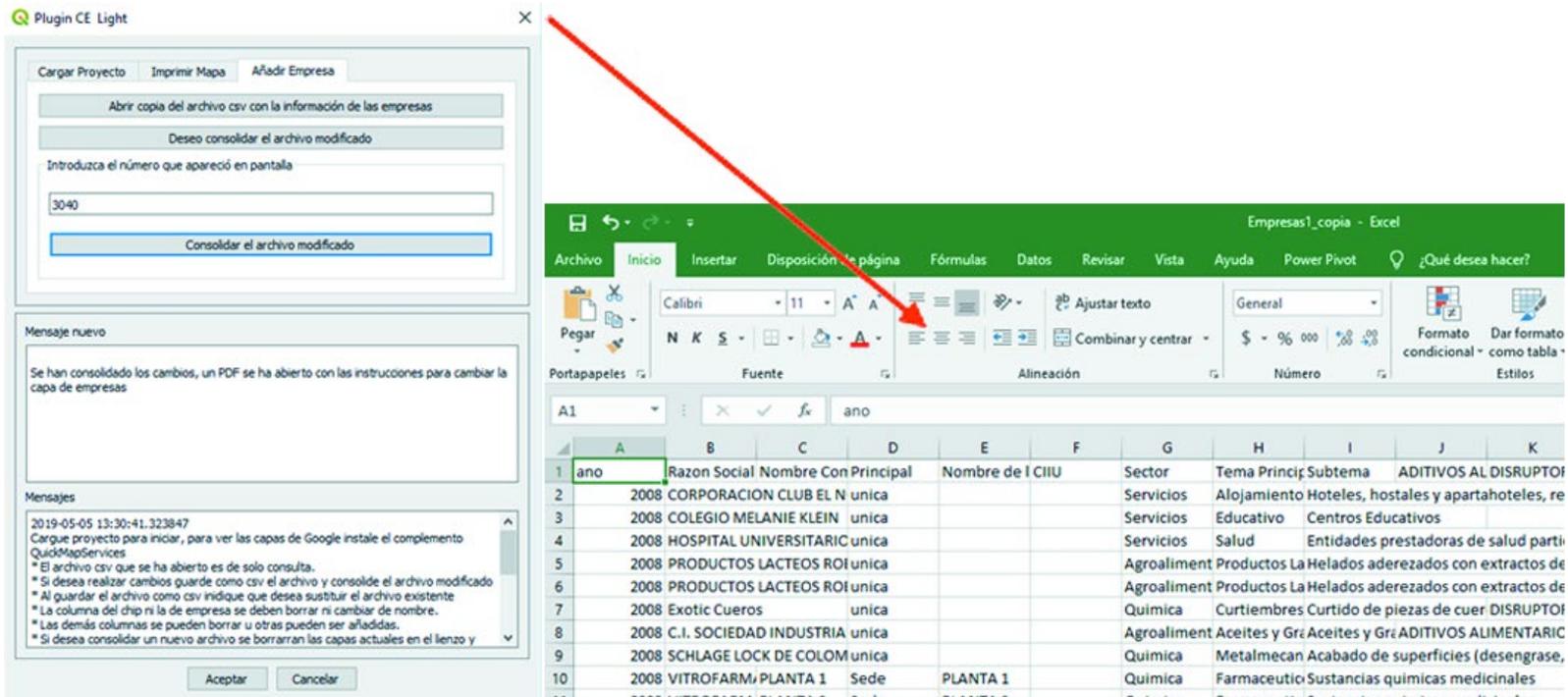


Figura 9. Ventana de la pestaña “añadir empresa” con la descarga de archivo csv, el cual se puede visualizar y editar en Microsoft Excel.

Al momento de ejecutar el *plugin*, esta pestaña tiene el botón “abrir copia del archivo csv con la información de las empresas”, en el cual se descarga una copia de la base de datos de las empresas, que fue descrita y explicada para su debido diligenciamiento e interpretación en el numeral 2.2.3 Tabla 3. Cabe aclarar que este archivo también surge como una salida del *plugin*, ya que se puede guardar y convertir a otros formatos usando la información contenida en un archivo *xs/x*.

Pero siguiendo la explicación detallada del resultado de los procesos del *plugin*, se realizó un ejemplo de la creación de una nueva empresa supuesta, es decir, que no existe en la realidad, pero que es visualmente entendible para dar a conocer la funcionalidad de esta pestaña. Se creó la empresa denominada "X combustible", la cual almacena y distribuye combustible cerca del Aeropuerto Internacional El Dorado; esta ubicación se eligió para tener el mismo punto de referencia de los anteriores numerales. Como primera instancia se seleccionó un polígono cualquiera del *layer* "predios_Bogotá", con la condición de que no se encontrara dentro del *layer* empresas.

El polígono elegido se resalta con un color rojo en la Figura 10, donde al identificar dicho polígono en el *layer* predial denominado "predios_Bogotá", el dato de mayor importancia en su tabla de atributos es el CHIP del predio, pues éste es el campo por medio del cual se vinculan los datos al *layer* de empresas.

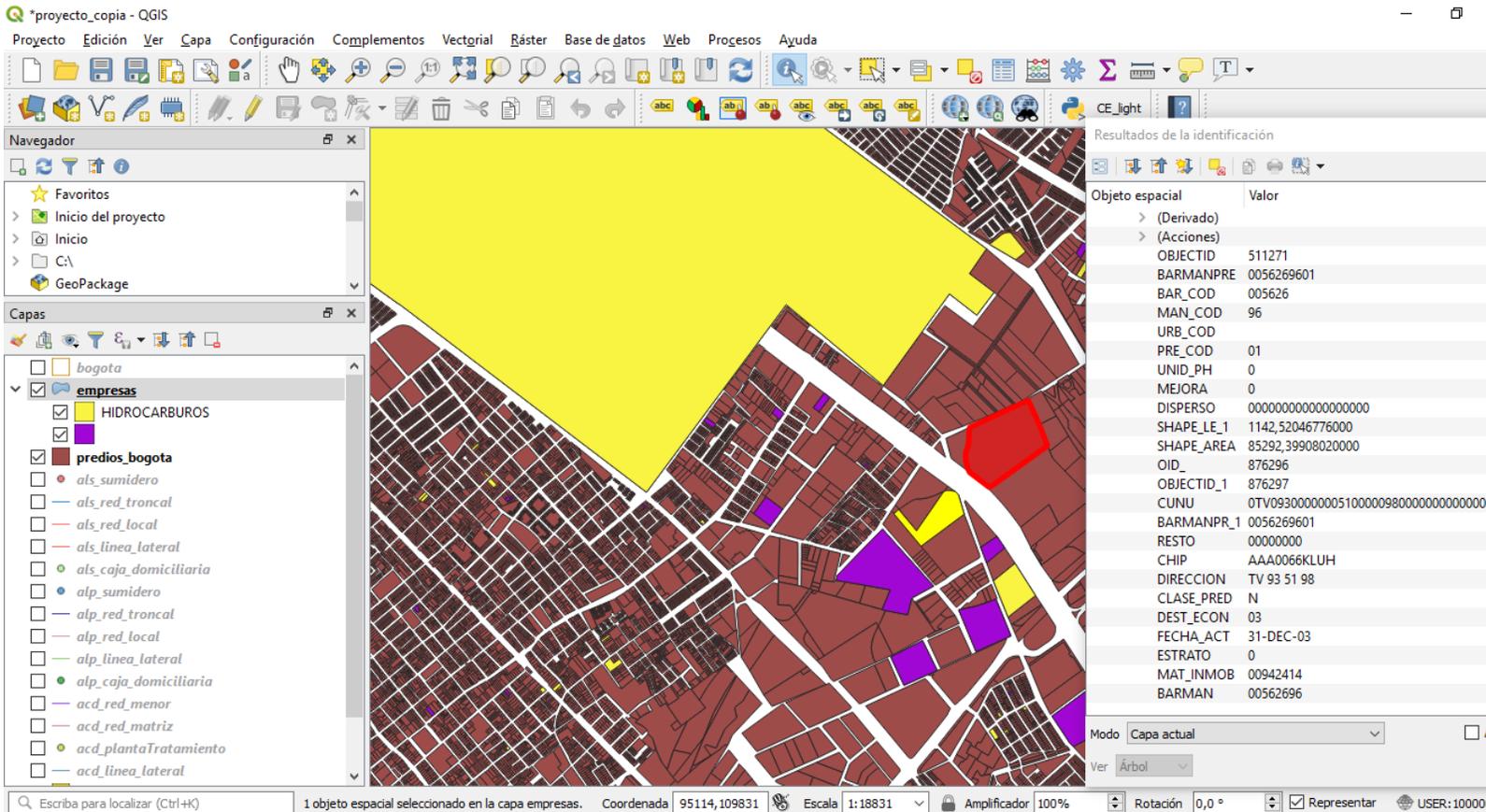


Figura 10. Elección de predio sin actividad comercial o industrial, identificando el CHIP correspondiente a este polígono para alimentar la base de datos.

Según la actividad elegida para la empresa "X combustibles" se diligenciaron los campos más relevantes de la base de datos así; razón social y nombre comercial: Empresa X Combustibles; CIIU: G505100; sector: hidrocarburos; tema: estaciones de servicio; subtema: venta y distribución de combustibles, hidrocarburos como CE; localidad: Fontibón, No. Local: 9; cuenca: Fucha; código cuenca: F; ID predio: F9-00000;

CHIP: AAA0066KLUH; origen de la descarga: lavado de islas; tipo de receptor: red de alcantarillado. Cabe aclarar que se puede modificar la base de datos insertando o eliminando campos, pero las columnas de CHIP y la última de Empresa no se deben modificar ni eliminar.

Al terminar la edición de la base de datos se guarda la copia modificada en la carpeta de "shapes_plugin_light", reemplazando el archivo con el mismo nombre empresas1_copia; y se aplica el botón "deseo consolidar el archivo modificado", donde aparecerá un número al azar que debe ser ingresado en la ventana; el usuario debe confirmar que desea realizar una modificación de los datos; al pulsar el último botón "consolidar el archivo modificado" se descargará automáticamente un documento PDF que contiene las instrucciones para cargar el nuevo *layer* de empresas, pues se borrará lo que se tenía anteriormente en el lienzo.

En esta guía se explica básicamente cómo se une el campo de CHIP del nuevo *layer* que se creó "predios_empresa" (Figura 11) y el *layer* "predios_bogotá", depurando las bases de datos y creando un nuevo *shapefile* con la nueva empresa incorporada (Figura 11), para luego reemplazarlo por el *layer* empresas; la información se actualiza cuando se carga de nuevo el proyecto en la primera pestaña.

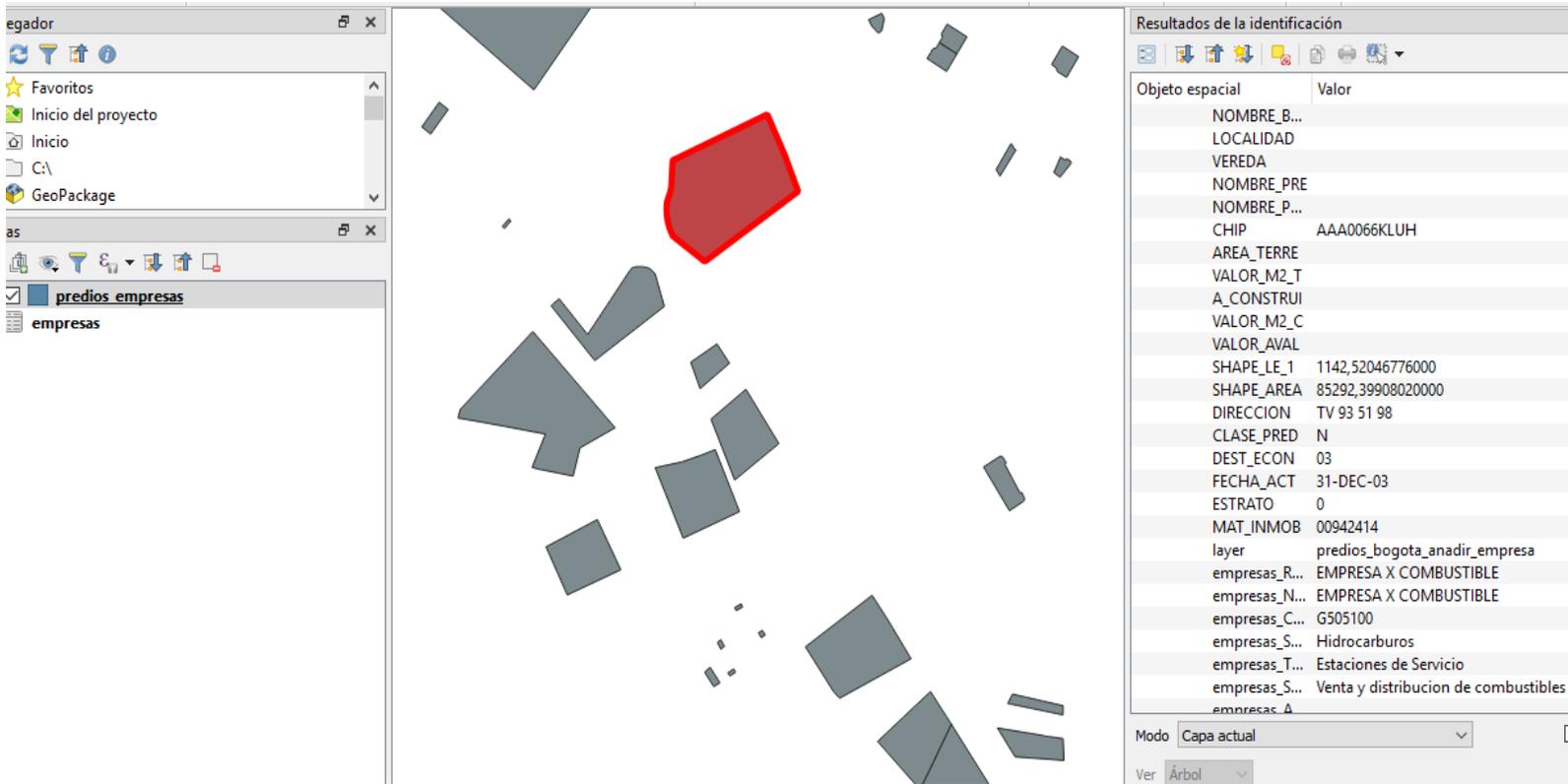


Figura 11. Creación de capa de predios de empresas con el polígono de la nueva empresa ingresada. En la parte derecha se visualizan los datos de identificación del predio donde se encuentra el nombre (Empresa X Combustibles), sector (hidrocarburos) y demás datos ingresados al formato csv inicialmente.

Esta última pestaña es de gran importancia, ya que como se demostró es donde se pueden modificar datos y volver a ser consolidados para que forman parte nuevamente del *plugin*, y actualizando los datos por medio del manejo adecuado de un documento csv o su importación a un xlsx, donde se pueden cargar grandes volúmenes de información.

Clasificación de todas las empresas e industrias por CE que originan

De las 1 263 empresas encontradas en el *shapefile* se realizó un conteo filtrando en la tabla de atributos del *layer* empresas de cada uno de los CE o la combinación de éstos que se puedan presentar, determinando el porcentaje de participación de cada categoría dentro del total de las empresas, como se relaciona en la Tabla 4. Asimismo, se generó un mapa (Figura 12) que muestra espacialmente y por medio de convenciones la distribución de todos los CE considerados en este proyecto; se encontró que la mayoría de las empresas se ubican en la zona central y sur de Bogotá D.C., y que para los usuarios es recomendable imprimir por medio del *plugin* mapas individuales de cada CE, para observar la posible presencia o ausencia del contaminante en el área que se necesite evaluar.

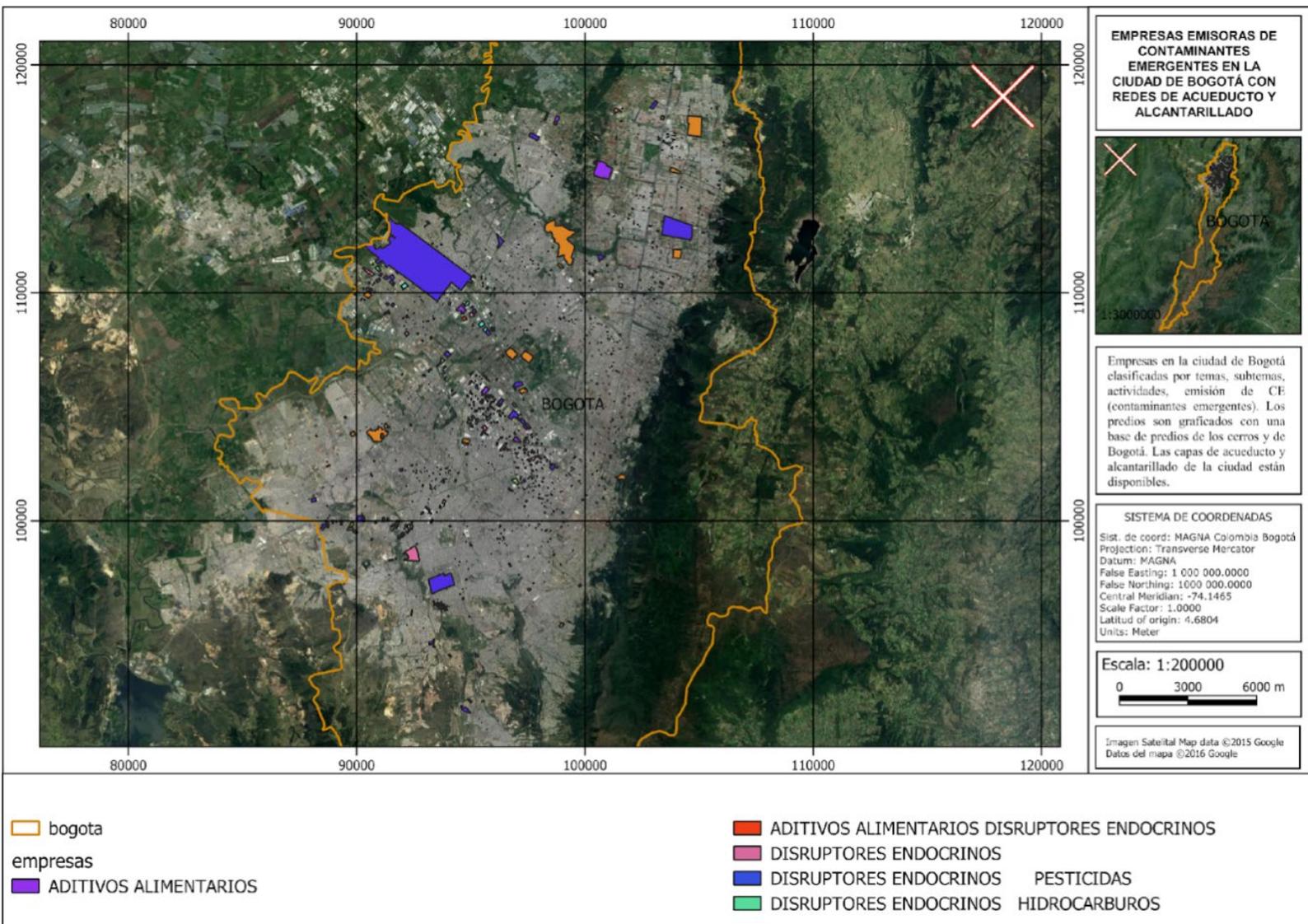


Figura 12. Mapa resultado de evaluación de todos los grupos de CE.

Tabla 4. Cantidad de empresas que presentan uno o más CE con su respectivo porcentaje en cuanto a la totalidad de empresas.

Cantidad de empresas	Contaminantes emergentes	Porcentaje (%)
220	Aditivos alimenticios	17.4
14	Aditivos alimenticios y disruptores endocrinos	1.1
195	Disruptores endocrinos	15.4
2	Disruptores endocrinos y pesticidas	0.2
32	Disruptores endocrinos e hidrocarburos	2.5
8	Disruptores endocrinos, hidrocarburos y productos del cuidado personal	0.6
2	Fármacos	0.2
49	Fármacos y productos cuidado personal	3.9
35	Filtros ultravioleta y productos cuidado personal	2.8
13	Filtros ultravioleta e hidrocarburos	1.0
1	Filtros ultravioletas, hidrocarburos y productos cuidado personal	0.1
585	Hidrocarburos	46.3
6	Hidrocarburos y productos cuidado personal	0.5
1	Hidrocarburos y pesticidas	0.1
2	Pesticidas	0.2
50	Productos cuidado personal	4.0
48	Ninguno	3.8

El CE más significativo es el de hidrocarburos, con el 46.9 % de participación en las empresas presentadas, el cual se distribuye

especialmente por toda la ciudad, como ya se había mostrado en la Figura 7; es decir, no hay una gran concentración de empresas que presenten este contaminante en un mismo lugar, esto se debe a que la mayoría de ellas son estaciones de servicio y lavaderos de vehículos, los cuales suplen la necesidad de abastecimiento de combustible y servicio para los automóviles en diferentes puntos de la urbe; esta característica genera que el contaminante hidrocarburos tenga un grado de dificultad mayor para su control.

Los siguientes porcentajes más altos son los de aditivos alimenticios (18.5 %) y disruptores endocrinos (18.7 %), que tienen como característica tener pequeños polígonos pertenecientes a sectores industriales; a diferencia de hidrocarburos que pertenecían a servicios, el sector característico de los aditivos alimenticios es el agroalimentario relacionado con actividades de procesamiento de cárnicos, confiterías y lácteos, entre otros; y el de los disruptores endocrinos es el químico con actividades metalmecánicas, curtiembre y otras. Estos polígonos, a pesar de tener actividades representativas, son de área reducida debido a que la industria bogotana en su mayoría se compone de microempresas, y pequeñas y medianas empresas según el ente privado Cámara de Comercio de Bogotá D.C.; sin embargo, que sean pequeñas no es un indicador de la concentración del CE que pueden estar aportando al recurso hídrico, por lo tanto, se propone al usuario del *plugin* que para el análisis de la presencia o ausencia de estos tipos de CE use escalas de mapa menores a 1:50 000, sugerencia que también aplicaría al resto de categorías filtradas.

Como ya se observó, el objetivo primordial del *plugin* es ser una herramienta de ayuda técnica espacial en el control y seguimiento de la contaminación hídrica urbana, en específico en contaminantes emergentes generados por los diferentes sectores productivos. Su capacidad espacial, visual y de almacenamiento de información es una ayuda en la gestión del territorio y en la administración del recurso hídrico urbano.

Beneficios y limitaciones del *plugin* CE

La herramienta SIG usada para el *plugin* es gratuita, soporta varios sistemas operativos y al tener licencia GNU no requiere del pago de la misma para su uso, lo cual facilita su acceso a todo tipo de usuarios y los incentiva para la generación de conocimiento sobre los CE. Además, la ejecución de este *plugin* no requiere conocimientos especializados en la plataforma, al contar con una guía de instalación, mensajes de acompañamiento para cada pestaña y botón, junto con una serie de guías que de forma ilustrativa generan un paso a paso de las acciones que se realizan directamente en QGIS.

Se buscó que el *plugin* fuera versátil, de tal forma que sirviera para diferentes tipos de usuarios y que se alineara con varios campos del saber e instituciones, razón por la cual los mapas y la tabla de resultados se pueden generar para distintas escalas, lo que hace posible que en un territorio como el de Bogotá D.C., que abarca 1 775 kilómetros cuadrados

de superficie haya proyectos al detalle de ciudad, localidad, UPZ, cuenca hidrosanitaria o barrios, según corresponda con los intereses de quien ejecute CE *light*. Otro beneficio del uso de las diferentes escalas es que se puede precisar información que necesita una resolución a una escala 1:5 000, como la ubicación del punto de descarga de agua residual de determinada empresa y la acometida que tiene hacia la red de alcantarillado, identificando también la cámara de inspección más cercana para un posible punto de muestreo en investigaciones futuras, evitando que por la alta densidad de las redes y los pozos suceda sobreposición de éstos en una escala mayor, que genere que el mapa no sea claro o que pierda detalle.

Las aplicaciones que se le pueden dar al *plugin* están dadas por la persona que lo ejecute y el campo en el que se evalúen sus resultados, ya que quien los analice puede generar insumos para todo tipo de gestión, como en el caso del ordenamiento territorial, sistemas de monitoreo o control, e incluso investigaciones en el campo de la salud ambiental.

Los desarrolladores generan actualizaciones de todas las plataformas para aumentar el rendimiento de los programas, siendo necesario el mantenimiento para acoplarse a nuevas versiones de QGIS que puedan ocasionar su incompatibilidad.

En este caso, la revisión también hace referencia a la trazabilidad de la información que se utiliza como insumo, ya que ésta debe ser precisa para que sus resultados sean vigentes y puedan contribuir a la detección de CE en el momento que se requiera. Es importante que en la actualización de los registros del *plugin* haya una adecuada categorización

de los CE generados en una nueva industria, para así evitar que el *plugin* dé lugar a resultados erróneos.

Toda actualización de los registros de empresa debe incluir el código de identificación del predio, pues un registro abundante de industrias, pero sin códigos CHIP no va a generar las salidas esperadas ni contenido visual, como mapas, para su posterior análisis, lo que lleva a resultados parciales que no muestran la situación actual.

El *plugin*, aunque no se alimenta de forma automática de alguna fuente oficial de datos, permitirá la determinación de zonas con presencia de CE siempre y cuando los campos en la base de datos de empresas estén adecuadamente diligenciados y completos. Es aconsejable una revisión de la vigencia de los archivos al momento de iniciar un proyecto.

Recomendaciones de uso

El *plugin CE* para QGIS es una herramienta que permite determinar la posible presencia de uno o varios CE de forma estandarizada y guiada para cualquier tipo de usuario. Sus cualidades permiten el filtrado por contaminantes específicos y una rápida evaluación gráfica para la determinación de los mismos en un sitio específico. Con esta información como insumo se abre el espacio para continuar con la investigación y la gestión de los CE, lo que da lugar a nuevos proyectos donde se puedan llevar a cabo cuantificaciones de las concentraciones en el agua.

Se propone que en estudios posteriores se haga la medición de contaminantes emergentes en campo, porque además de generar resultados para una investigación paralela, también servirá como método de detección para saber si las sustancias se encuentran en un lugar específico de la red de alcantarillado, lo que hará posible evaluar y validar la precisión de CE *light* como herramienta previa para encontrar sustancias de interés.

Se plantea que en el futuro se hagan muestreos en varias zonas en la red de alcantarillado donde no se observe un grupo de CE, para que se comparen sus resultados con datos de medición de zonas en los que se esperaría hallar concentraciones del mismo según el *plugin*. Esto implicaría que se ejecute la herramienta con la escala de mayor detalle. Así, se puede corroborar la información que el *plugin* arroja como resultado y avanzar en estudios sobre CE para Bogotá D.C.

La herramienta se diseñó acomodándose a las divisiones administrativas de Bogotá D.C., sin embargo, si se quisiera replicar para otras ciudades del mundo, se necesitaría hacer una adaptación con la información disponible de la ciudad objetivo. Existen datos que no necesitarían un equivalente, como la UPZ o localidad, pero otros, como el CHIP, sí tendrían que tener un par que cumpla la misma función, es decir, un código alfanumérico o numérico que identifique un único predio. Estos identificadores pueden provenir de las bases prediales oficiales existentes en países de América Latina y el Caribe, que son creadas para establecer los impuestos o contribuciones tributarias para bienes inmuebles.

Conclusiones

El *plugin CE* es una herramienta enfocada a la gestión ambiental de contaminantes emergentes, la cual, por su capacidad de almacenamiento de información y su georreferenciación, es una ayuda en el control y seguimiento de descargas residuales líquidas por sectores productivos mediante la decisión de las ubicaciones de muestreo en la ejecución de planes de monitoreo y seguimiento para CE en aguas residuales industriales. De igual manera, esta herramienta puede emplearse como fuente de planificación territorial, y de manejo y administración de la infraestructura de saneamiento urbano y de cuerpos de agua.

La implementación en un sistema de información geográfica permite la generación de mapas que muestran la existencia de un determinado contaminante emergente por procesos productivos en zonas específicas (estudio de caso de la ciudad de Bogotá D.C.), lo que permite continuar generando conocimiento sobre los CE y aportar en procesos de la gestión, seguimiento y monitoreo de estos contaminantes en el recurso hídrico, el cual es actualmente escaso y únicamente de carácter académico.

Este *plugin* genera resultados que pueden ser base de ayuda o interconectarse con modelos de contaminantes hídricos, con modelos de contaminación en sistemas de drenaje, para el desarrollo de infraestructura, y para el análisis de riesgo a la exposición de estas sustancias entre muchas aplicaciones, ya que genera como salida

información asociada con los predios, industrias y contaminantes presentes para un sector determinado.

Referencias

- Abbott, D. (2018). Chapter 11. Graphics programming with QT. In: Abbott, D. (ed.). *Linux for Embedded and real. Time Applications* (pp. 173-185) (4th ed.). DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811277-9.00011-0>
- Adeola-Fashae, O., Abiola-Ayorinde, H., Oludapo-Olusola, A., & Oluseyi-Obateru, R. (2019). Landuse and surface water quality in an emerging urban city. *Applied Water Science*, 9(2), 25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0903-2>
- Albrecht, J. (2018). 1.31. GIS Project Management. In: Huang, B. (ed.). *Comprehensive Geographic Information Systems* (pp. 446-477). DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09612-3>
- Aldana, M. J., & López, F. S. (2017). Water distribution system of Bogotá City and its surrounding area, Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAB E.S.P. *Procedia Engineering*, 186, 643-653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.281>

- Alvarado, J. G., Delgado-Linares, J. G., & Medina, H. R. (2015). Rol de la química orgánica en los procesos de conversión de hidrocarburos. *Educación Química*, 26(4), 288-298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eq.2015.08.001>
- Aminot, Y., Sayfritz, S. J., Thomas, K. V., Godinho, L., Botteon, E., Ferrari, F., Boti, V., Albanis, T., Köck-Schulmeyer, M., Diaz-Cruz, S., Farré, M., Barceló, D., Marques, A., & Readman, J. W. (September, 2019). Environmental risks associated with contaminants of legacy and emerging concern at European aquaculture areas. *Environmental Pollution*, 252(Part B), 1301-1310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.133>
- Amores, M. J., Meneses, M., Pasqualino, J., Antón, A., & Castells, F. (2013). Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach. *Journal of Cleaner Production*, 43, 84-92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.033>
- Biel-Maeso, M., Corada-Fernández, C., & Lara-Martín, P. A. (2019). Removal of personal care products (PCPs) in wastewater and sludge treatment and their occurrence in receiving soils. *Water Research*, 150, 129-139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.045>

- Boelee, E., Geerling, G., van der Zaan, B., Blauw, A., & Vethaak, A. D. (2019). Water and health: From environmental pressures to integrated responses. *Acta Tropica*, 193, 217-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2019.03.011>
- Borcherds, P. H. (2007). Python: A language for computational physics. *Computer Physics Communications*, 177(1), 199-201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.02.019>
- Causanilles, A., Ruepert, C., Ibáñez, M., Emke, E., Hernández, F., & De Voogt, P. (2017). Occurrence and fate of illicit drugs and pharmaceuticals in wastewater from two wastewater treatment plants in Costa Rica. *Science of the Total Environment*, 599-600, 98-107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.202>
- Chen, D., Shams, S., Carmona-Moreno, C., & Leone, A. (2010). Assessment of open source GIS software for water resources management in developing countries. *Journal of Hydro-environment Research*, 4(3), 253-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.04.017>

- Delgado, N., Capparelli, A., Navarro, A., & Marino, D. (2019). Pharmaceutical emerging pollutants removal from water using powdered activated carbon: Study of kinetics and adsorption equilibrium. *Journal of Environmental Management*, 236, 301-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.116>
- Dharupaneedi, S. P., Nataraj, S. K., Nadagouda, M., Reddy, K. R., Shukla, S. S., & Aminabhavi, T. M. (2019). Membrane-based separation of potential emerging pollutants. *Separation and Purification Technology*, 210, 850-866. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.003>
- Dimpe, K. M., & Nomngongo, P. N. (2016). Current sample preparation methodologies for analysis of emerging pollutants in different environmental matrices. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 82, 199-207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.05.023>
- Dvořáková-Březinová, T., Vymazal, J., Koželuh, M., & Kule, L. (2018). Occurrence and removal of ibuprofen and its metabolites in full-scale constructed wetlands treating municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 120, 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.020>

- El-Bastawesy, M., Adel, S., & Mohamed, I. N. L. (2018). Management of waste water discharge within the Nile Valley of Egypt: The collapse of Al Ballanah waste water's lake in Aswan in September 2013. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(2), 149-158. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.11.004>
- Ferreira, I., & Caroch, M. (2017). Food additives: Classification, regulation and analysis. In: *Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14310-0>
- Grzesiuk, M., Spijkerman, E., Lachmann, S. C., & Wacker, A. (2018). Environmental concentrations of pharmaceuticals directly affect phytoplankton and effects propagate through trophic interactions. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 156, 271-278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.019>
- He, K., Hain, E., Timm, A., Tarnowski, M., & Blaney, L. (2019). Occurrence of antibiotics, estrogenic hormones, and UV-filters in water, sediment, and oyster tissue from the Chesapeake Bay. *Science of the Total Environment*, 650, 3101-3109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.021>

- Jia, Y., Schmid, C., Shuliakevich, A., Hammers-Wirtz, M., Gottschlich, A., der Beek, T. A., Yin, D., Qin, B., Zou, H., Dopp, E., & Hollert, H. (2019). Toxicological and ecotoxicological evaluation of the water quality in a large and eutrophic freshwater lake of China. *Science of the Total Environment*, 667, 809-820. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.435>
- Köck-Schulmeyer, M., Villagrasa, M., López-de-Alda, M., Céspedes-Sánchez, R., Ventura, F., & Barceló, D. (2013). Occurrence and behavior of pesticides in wastewater treatment plants and their environmental impact. *Science of the Total Environment*, 458-460, 466-476. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.010>
- Langat, P. K., Kumar, L., & Koech, R. (2019). Monitoring river channel dynamics using remote sensing and GIS techniques. *Geomorphology*, 325, 92-102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.007>
- Mantovani, A. (2019). Endocrine disruptors: A review. In: Melton, L., Shahidi, F., & Varelis, P. (eds.). *Encyclopedia of food chemistry* (pp. 481-486). DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21810-6>

- Marchetti, D., Oliveira, R., & Figueira, A. R. (2019). Are global north smart city models capable to assess Latin American cities? A model and indicators for a new context. *Cities*, 92, 197-207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.001>
- Meyer, D., & Riechert, M. (2019). Open source QGIS toolkit for the advanced research WRF modelling system. *Environmental Modelling & Software*, 112, 166-178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.018>
- Nielsen, A., Bolding, K., Hu, F., & Trolle, D. (2017). An open source QGIS-based workflow for model application and experimentation with aquatic ecosystems. *Environmental Modelling & Software*, 95, 358-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.032>
- Novotna, K., Cermakova, L., Pivokonska, L., Cajthaml, T., & Pivokonsky, M. (2019). Microplastics in drinking water treatment. Current knowledge and research needs. *Science of the Total Environment*, 667, 730-740. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.431>

- Pal, A., He, Y., Jekel, M., Reinhard, M., & Gin, K. Y.-H. (2014). Emerging contaminants of public health significance as water quality indicator compounds in the urban water cycle. *Environment International*, 71, 46-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.05.025>
- Peña-Álvarez, A., & Castillo-Alanís, A. (2015). Identificación y cuantificación de contaminantes emergentes en aguas residuales por microextracción en fase sólida-cromatografía de gases-espectrometría de masas (MEFS-CG-EM). *TIP*, 18(1), 29-42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2015.05.003>
- Peña-Guzmán, C. A., Melgarejo, J., & Prats, D. (2016). El ciclo urbano del agua en Bogotá, Colombia: estado actual y desafíos para la sostenibilidad/The urban water cycle in Bogotá, Colombia: Current Status and challenges for sustainability. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(6), 57.
- Peña-Guzmán, C. A., Melgarejo, J., López-Ortiz, I., & Mesa, D. (2017). Simulation of infrastructure options for urban water management in two urban catchments in Bogotá. *Water*, 9(11), 858, 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9110858>

- Peña-Guzmán, C., Ulloa-Sánchez, S., Mora, K., Helena-Bustos, R., Lopez-Barrera, E., Alvarez, J., & Rodriguez-Pinzón, M. (2019). Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature. *Journal of Environmental Management*, 237, 408-423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>
- Polyakova, O. V., Artaev, V. B., & Lebedev, A. T. (2018). Priority and emerging pollutants in the Moscow rain. *Science of the Total Environment*, 645, 1126-1134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.215>
- QGIS. (s.f.). *Plugin development*. QGIS A Free and Open Source Geographic Information System. Recuperado de <https://qgis.org/en/site/getinvolved/development/plugindevelopment.html>
- QT. (s.f.). *Qt for Python* (QT Software development made smarter). Recuperado de <https://doc.qt.io/qtforpython/>
- Rodil, R., Villaverde-de-Sáa, E., Cobas, J., Quintana, J. B., Cela, R., & Carro, N. (2019). Legacy and emerging pollutants in marine bivalves from the Galician coast (NW Spain). *Environment International*, 129, 364-375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.018>

Rojas-Bernal, C. L. (2013). *Water urbanism in Bogotá. Exploring the interplay between settlement patterns and water management.*

Recuperado de

https://www.researchgate.net/publication/299649553_Water_Urbanism_in_Bogota_Exploring_the_interplay_between_settlement_patterns_and_water_management

Rossetto, R., De Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Criollo, R., & Vázquez-Suñé, E. (2018). Integrating free and open source tools and distributed modelling codes in GIS environment for data-based groundwater management. *Environmental Modelling & Software*, 107, 210-230. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.007>

Rozos, E., & Makropoulos, C. (2013). Source to tap urban water cycle modelling. *Environmental Modelling & Software*, 41, 139-150. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.11.015>

Sherman, G. E. (2014). *The PyQGIS programmer's guide: Extending QGIS 2.x with Python.* Recuperado de

<https://locatepress.com/book/ppg>

- Singh, A. (2019). Remote sensing and GIS applications for municipal waste management. *Journal of Environmental Management*, 243, 22-29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.017>
- Steiniger, S., & Hay, G. J. (2009). Free and open source geographic information tools for landscape ecology. *Ecological Informatics*, 4(4), 183-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2009.07.004>
- Stevović, S., & Nestorović, Ž. (2016). Impact of environment GIS modeling on sustainable water systems management. *Procedia Engineering*, 162, 293-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.063>
- Sun, S., Chen, Y., Lin, Y., & An, D. (2018). Occurrence, spatial distribution, and seasonal variation of emerging trace organic pollutants in source water for Shanghai, China. *Science of the Total Environment*, 639, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.089>
- Torres, A., Méndez-Fajardo, S., López-Kleine, L., Galarza-Molina, S., & Oviedo, N. (2013). Calidad de vida y ciudad: análisis del nivel de desarrollo en Bogotá a través del método de necesidades básicas insatisfechas. *Estudios Gerenciales*, 29(127), 231-238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.estger.2013.05.011>

- van Lindert, P. (2016). Rethinking urban development in Latin America: A review of changing paradigms and policies. *Habitat International*, 54, 253-264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.11.017>
- van Wezel, A. P., van den Hurk, F., Sjerps, R. M. A., Meijers, E. M., Roex, E. W. M., & Ter-Laak, T. L. (2018). Impact of industrial waste water treatment plants on Dutch surface waters and drinking water sources. *Science of the Total Environment*, 640-641, 1489-1499. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.325>
- Verlicchi, P., Galletti, A., Petrovic, M., & Barceló, D. (2010). Hospital effluents as a source of emerging pollutants: An overview of micropollutants and sustainable treatment options. *Journal of Hydrology*, 389(3), 416-428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.005>
- Vystavna, Y., Frkova, Z., Celle-Jeanton, H., Diadin, D., Huneau, F., Steinmann, M., Crini, N., & Loup, C. (2018). Priority substances and emerging pollutants in urban rivers in Ukraine: Occurrence, fluxes and loading to transboundary European Union watersheds. *Science of the Total Environment*, 637-638, 1358-1362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.095>

Zhou, S., Di Paolo, C., Wu, X., Shao, Y., Seiler, T.-B., & Hollert, H. (2019). Optimization of screening-level risk assessment and priority selection of emerging pollutants. The case of pharmaceuticals in European surface waters. *Environment International*, 128, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.034>